МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Технологія та обладнання термічної обробки металів»
для студентів спеціальності G8 «Матеріалознавство»
усіх форм навчання

2026

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Технології та обладнання термічної обробки металів» для студентів спеціальності G8 «Матеріалознавство» усіх форм навчання /Укл.: О.А. Глотка, О.В. Лисиця. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 66 с.

Укладачі: О.А. Глотка, к.т.н., доцент
О.В. Лисиця, ст.викладач

Рецензент: О.В. Климов, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: Д.В. Ткач, к.т.н., доцент

Рекомендовано до видання НМК інженерно- фізичного факультету Протокол №1 від 08 вересня 2026 р.	Затверджено на засіданні кафедри “Фізичне матеріалознавство” Протокол №1 від 26 серпня 2026р.

ЗМІСТ

с.
Програма дисципліни ……. 4
Лабораторна робота №1 Цементація, види цементації, режими ТО цементованої сталі …….. 8
Лабораторна робота №2 Оптимізація вибору матеріалів для типових виробів за різними критеріями ……... 16
Лабораторна робота №3 Прогнозування зміни структури, властивостей матеріалів та розмірів виробів при їх зберіганні, випробуваннях та експлуатації ……. 25
Лабораторна робота №4 Статистичний аналіз точності технологічних процесів термічної обробки ……. 30
Лабораторна робота №5 Обґрунтування вибору матеріалу та технології термічної обробки для заданого виробу …… 43
Лабораторна робота №6 Статистичний аналіз стабільності технологічних процесів термічної обробки та їх статистичне регулювання …… 50
Перелік джерел посилань …….. 62
Додаток А Інтегральна функція нормального розподілу ……... 63

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Мета: викладання дисципліни полягає в тому, щоб розкрити можливості раціонального вибору матеріалу і технології термічної обробки, які забезпечуватимуть одержання необхідного рівня механічних та експлуатаційних властивостей виробів при умові економного витрачання матеріалів і енергетичних ресурсів в процесі їх виготовлення.

Завдання: полягає в тім, що на основі знань теорії термічної обробки і принципів легування машинобудівних матеріалів, ураховуючи при цьому умови роботи виробів при експлуатації, навчити майбутніх фахівців науково обґрунтовувати вибір матеріалів і технологій термічної обробки для окремих груп виробів. При виборі технології необхідно враховувати її переваги та економічну доцільність в порівнянні з іншими спорідненими технологіями. У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен отримати:

- загальні компетентності - вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми; здатність генерувати нові ідеї та реалізовувати їх у вигляді обґрунтованих інноваційних рішень; навички використання новітніх інформаційних технологій; здатність до подальшого автономного та самостійного навчання на основі новітніх науково-технічних досягнень; здатність спілкуватися іноземною мовою в професійній (науково-технічній) діяльності;

- фахові компетентності - здатність критичного аналізу та прогнозування характеристик нових та існуючих матеріалів, параметрів процесів їх отримання та обробки; здатність застосовувати отримані знання для стандартизації, сертифікації й акредитації процесів термічної обробки металів, матеріалів та виробів; здатність застосовувати системний підхід до вирішення інженерних проблем на основі досліджень в рамках спеціалізації; здатність інтерпретувати, презентувати і захищати результати науково-дослідницької діяльності в фаховому середовищі та публікувати результати своїх досліджень у наукових фахових виданнях; здатність здійснювати аналіз техніко-економічних показників, безпеки застосування та експертизу конструкторсько-технологічних рішень щодо процесів термічної обробки та обладнання для їх здійснення; здатність розробляти плани і проекти для забезпечення досягнення поставленої певної мети з урахуванням всіх аспектів проблеми, що вирішується, включаючи виробництво,

експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію компонентів здійснення термічної обробки металі; здатність оцінювати показники надійності та ефективності функціонування виробів з застосованими процесами термічної обробки.

Очікувані програмні результати навчання - знання щодо оптимального вибору технологій термічної обробки і обладнання; знання, що забезпечать можливість теоретично обґрунтовувати конструкції обладнання на основі, загальних принципів конструювання, теорії взаємозамінності, нормативних та довідкових даних для контролю відповідності технічної документації, виробів і технологій стандартам, технічним умовам та іншим нормативним документам; знання конструкцій, методик вибору і розрахунку, основ обслуговування і експлуатації обладнання, що застосовується в процесах термічної обробки.

Змістовий модуль 1. Класифікація матеріалів і видів термічної обробки.

Тема 1. Класифікація конструкційних та інструментальних матеріалів за функціональним призначенням. Класифікація конструкційних та інструментальних матеріалів за функціональним призначенням. Матеріали із підвищеними міцністю та технологічністю. Матеріали, стійкі до спрацювання. Види спрацювань. Матеріали із високими пружними властивостями, стійкі до дії умов експлуатації (середовища, тиску, температури, часу): жароміцні, жаротривкі, корозійностійкі тощо. Інструментальні матеріали.

Тема 2. Класифікація технологічних операцій та процесів термічної обробки. Загальна характеристика, сутність та призначення основних операцій термічного оброблення (відпал I та II роду, гартування, відпускання, старіння, ХТО, в тому числі і комплексні методи оброблення).

Тема 3. Основи вибору матеріалів для деталей машин та інструментів. Основи вибору матеріалів для деталей машин та інструментів. Основні інформаційні джерела при пошуку матеріалів. Визначення експлуатаційних напружень та допустимих рівнів напружень. Чинники, котрі на них впливають. Заходи по підвищенню надійності виробів. Основні складові, котрі визначають цю характеристику. Основні складові довговічності виробів. Заходи по забезпеченню та підвищенню довговічності виробів. Комплексні методи впливу на ресурс виробів: металургійні, конструкторські, технологічні, експлуатаційні.

Тема 4. Вибір матеріалів для виробів із врахуванням змін структури і властивостей в процесі зберігання, експлуатації та забезпечення розмірної стабільності. Зміни структури, хімічного складу, властивостей матеріалів в процесі зберігання та експлуатації виробів. Зміни, котрі відбуваються при зберіганні гум, полімерів, пластмас, сплавів на основі алюмінію. Вплив умов експлуатації на зміни структури, хімічного складу, властивостей корозійнотривких, жаростійких, жароміцних сталей та сплавів. Заходи по зменшенню швидкості протікання цих процесів. Стабільність розмірів виробів та заходи по її забезпеченню.

Тема 5. Комплексні методи оцінки ефективності вибору матеріалу. Комплексні методи оцінки ефективності вибору матеріалу. Несівна здатність виробу, основні чинники впливу. Обґрунтування вибору матеріалу за мінімальною масою при постійній надійності.

Змістовий модуль 2. Основи вибору технології оброблення.

Тема 6. Система технологічної підготовки виробництва (СТПВ).

Система технологічної підготовки виробництва СТПВ. Сутність, призначення, стандарти (ДСТУ 2974-95). Складові СТПВ: забезпечення технологічності виробу, розроблення технологічних процесів, проектування технологічного обладнання та пристосувань. Розробка та передача у виробництво нових технологій. Види випробувань виробів.

Тема 7. Статистичний контроль та регулювання якості виробів.

Статистичний контроль та регулювання якості виробів та технологічних процесів: основні терміни та їх визначення: вибірка, проба, точність, стабільність, статистичний контроль та регулювання. Статистичні характеристики матеріалів. Статистичний контроль та регулювання якості виробів: комплексна схема і її використання. Статистичне регулювання технологічних процесів та статистичний аналіз точності та стабільності процесу. Методи визначення точності та стабільності технологічних процесів. Аналіз рекламацій.

Тема 8. Порядок розроблення та передачі продукції у серійне виробництво. Порядок розроблення та передачі продукції у серійне виробництво. Основні етапи по розробці нових деталей, інструментів, приладів, обладнання. Пошукові роботи, науково-дослідні роботи, ескізне проектування. Розроблення технологічної документації. Технічне проектування, дослідно-експериментальні роботи. Виготовлення дослідних зразків виробів, інструментів, машин та проведення випробувань (лабораторних, стендових, натурних). Система державних ви-

пробувань продукції (ДСТУ 3021-95). Основні терміни, визначення, сутність. Перевірка експлуатаційно-технічної, конструктивної, технологічної, контрольної документації та передача у виробництво.

Тема 9. Матеріалознавчі основи вибору технології оброблення та обладнання. Матеріалознавчі основи вибору технології обробки та обладнання. Вхідні дані для вибору ТП, урахування альтернативних методів оброблення. Критерії оптимізації при виборі технології: енергозатрати, трудові затрати, собівартість, вплив на екологію. Енергозберігальні технології, термічне оброблення в потоці металургійного виробництва. Співставлення вибраних варіантів технології на одно – та багатокритеріальній основах. Обґрунтування вибору обладнання для здійснення вибраного технологічного процесу (річний випуск, умови праці, цехова собівартість). Уніфікація технолгій, технологічних пристосувань.

Тема 10. Техніко-економічне обґрунтування вибору варіанта термічної обробки (ТО). Вибір варіантів ТО на підставі техніко-економічного обґрунтування. Цехова собівартість – як базова характеристика запропонованого варіанта ТО. Складові цехової собівартості: основні матеріали, допоміжні матеріали, паливо, електроенергія, заробітна плата. Складові цехової собівартості: силова електроенергія, амортизація обладнання, технологічні речовини, ремонт і обслуговування обладнання, витрати на технологічні пристосування, на утримання виробничої площі. Аналіз цехової собівартості та напрямки по її зниженню.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1
ЦЕМЕНТАЦІЯ, ВИДИ ЦЕМЕНТАЦІЇ, РЕЖИМИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЦЕМЕНТОВАНОЇ СТАЛІ

Мета роботи: вивчити вплив хіміко-термічної обробки (ХТО) на структуру і властивості поверхневого шару виробів з вуглецевої і легованої сталей; ознайомитися з варіантами термічної обробки цементованих деталей, структурою і властивостями поверхневого шару і серцевини.

Загальні положення

У багатьох машинах і механізмах деталі працюють в умовах складного навантаження, зазнають знос, удар, згин, контактні напруження. Для експлуатації в зазначених умовах деталі повинні мати високу поверхневу твердість, міцний поверхневий шар, в'язку серцевину. Подібне поєднання властивостей може бути досягнуто поверхневим зміцненням деталей, виготовлених зі сплавів з високою пластичністю і в'язкістю. Один з найбільш розповсюджених методів поверхневого зміцнення – це хіміко-термічна обробка [1, с. 228-238], [2, с. 42-99], [3].

Елементарні процеси, що відбуваються при ХТО. Хіміко-термічна обробка – це процеси дифузійного насичення поверхневого шару виробів із зовнішнього середовища різними елементами в поєднанні з тепловим впливом.

При ХТО змінюється хімічний і фазовий склад, структура і, як наслідок, властивості поверхневого шару і деталі в цілому. Дифузійне насичення металів і сплавів проводиться при підвищених температурах, що забезпечує достатню рухливість атомів елементів, що насичують. Для зміни хімічного складу деталі нагрівають в хімічно активному середовищі. Під час витримки одночасно проходять ряд процесів: дисоціація (d), при якій відбувається утворення елемента, що насичує, в активному (атомарному) стані; абсорбція (A) атомів елемента, що насичує поверхню деталі; дифузія (D) атомів від поверхні в глибину, завдяки якій утвориться шар зі зміненим хімічним складом.

В залежності від співвідношення дисоціації d, абсорбції A і дифузії D залежить товщина шару і концентрація в ньому елемента, що насичує. Далі наведено основні крайні випадки.

При d < A, тобто дисоціація відстає від абсорбції. При цьому всі активні атоми елемента, що утворюються, поглинаються поверхнею. Концентрація елемента на поверхні в цьому випадку ніколи не досягає максимуму і ще існує певний резерв для подальшого збільшення абсорбції і концентрації елемента на поверхні виробу.

При d > A. В цьому випадку активних атомів елемента не тільки достатньо для досягнення максимуму при проходженні абсорбції, а є й зайві. Атоми, що не абсорбувались, починають знову об'єднуватись в молекули, утворюють навколо деталей шар цього елемента, який заважає активним атомам досягати поверхні деталі.

При d = A. При цьому всі атоми, що утворились при дисоціації, абсорбуються поверхнею. Цей випадок не тільки є оптимальним при проходженні цих двох елементарних процесів, а і забезпечує економію речовини, з котрої утворюються активні атоми елемента. Але його витримати майже неможливо. Тому більш ефективним є випадок, коли d < A із тенденцією d ≈ A.

Третім елементарним процесом при ХТО є дифузія. Саме вона забезпечує пересування абсорбованих атомів в глибину деталі від поверхні і забезпечує певну глибину поверхневого шару зміненої концентрації.

Якщо D < A, то абсорбовані поверхнею атоми не встигають пересунутись в глибину деталі. Вони накопичуються під поверхнею і цей шар має високу концентрацію третього елемента. Тобто концентрацію елемента в шарі можна регулювати не тільки інтенсивністю проходження дисоціації d, а і швидкістю дифузії D.

Коли D > A, то атоми від поверхні інтенсивно пересуваються в глибину і коли атмосфера в печі недостатньо активна, то поверхневий шар буде збіднений і має низьку концентрацію елемента.

Дифузія активно впливає не лише на концентрацію елемента, котрим насичують, а і на глибину шару. Якщо при D < A шар незначний, але добре насичений цим елементом, то при D > A – навпаки, при низькій концентрації цей шар має значну глибину x.

Основний параметр, що впливає на дифузію при насиченні даним елементом є температура, бо

$$D = Do \cdot e^{\frac{-Q}{RT}},$$

де Q – енергія активації дифузії елемента, а T – температура ХТО. Тобто дифузія знаходиться в експоненціальній залежності від температури і із декотрим збільшенням температури її швидкість інтенсивно зростає, тому зростає і глибина шару. Глибина шару також залежить від часу, впродовж котрого проходить процес ХТО. В цьому випадку $x = \kappa \cdot \sqrt{\tau}$, тобто тут залежність параболічна при постійній температурі. Але якщо із збільшенням температури інтенсифікація процесу безперервно збільшується і більше стає глибина х, то при збільшенні часу швидкість формування шару, мм/год, поступово зменшується і гілки параболи асимптотично наближаються до прямої лінії.

Таким чином концентрація і глибина шару визначається такими технологічними параметрами процесу насичення як температура, час, кількість і активність елемента, котрим насичують, хімічним складом стопу, який також впливає на інтенсивність ХТО.

Енергія активації, як чинник, від котрого залежить швидкість дифузії, активно впливає на час ХТО при даній температурі. Так, при насиченні елементами проникнення вона майже вдвічі менша, чим коли насичують елементами заміщення. У зв'язку з цим швидкість ХТО при насиченні елементами заміщення на декілька порядків менша, чим атомами проникнення.

Основні технологічні аспекти цементації сталі. Цементація – це процес дифузійного насичення вуглецем поверхневих шарів виробів зі сталей. Від цементованих виробів вимагаються висока поверхнева твердість, опір втомі, зносостійкість у сполученні з в'язкою серцевиною, тому для їхнього виготовлення застосовують маловуглецеві сталі (0,10...0,25% С) з задовільною міцністю і високою в'язкістю.

Розчинність вуглецю у фериті низька, тому цементацію проводять в аустенітному стані, тобто при температурах вище Ac_3 для даної цементованої сталі. Інтервал температур цементації 920...950°С. З підвищенням температури цементації пришвидшується процес насичення, зростає рівномірність розподілу вуглецю по глибині шару. Разом з тим підвищення температури цементації призводить до збільшення розміру аустенітного зерна, схильності сталі до крихкого руйнування, погіршення механічних властивостей як серцевини, так і цементованого шару.

Оптимальний вміст вуглецю в шарі 0,8...1,0%. При зниженому вмісті вуглецю не досягається необхідна твердість (≥58 HRC), а при підвищеному - шар характеризується низькою в'язкістю через присут-

ність грубих надлишкових карбідів чи карбідної сітки. Глибина шару h призначається конструктором в залежності від розмірів деталей, контактних напружень і коливається в межах 0,2...2,0 мм.

Речовини, що є джерелом вуглецю при цементації, називаються карбюризаторами. В залежності від агрегатного стану карбюризатора існує цементація в твердому і газовому карбюризаторі.

Твердим карбюризатором є суміш деревного вугілля (березового) з вуглекислими солями $BaCO_3$, Na_2CO_3. Деталі поперемінно з карбюризатором укладають у сталеві ящики, що закривають кришками і замазують глиною. Після сушіння ящики завантажують у піч. При нагріванні всередині цементаційних ящиків утворюється окис вуглецю CO, котра при взаємодії з поверхнею деталі розкладається на атомарний вуглець, який абсорбується металом, та двоокис вуглецю

$$2CO \rightarrow C_{am} + CO_2 .$$

При газовій цементації як карбюризатори використовують: ендогаз – продукт неповного згорання природного газу з домішками 10% свіжого природного газу; рідкі вуглеводні – синтин, гас, піробензол. Природний газ, органічні рідини при температурі цементації в реторті дисоціюють з утворенням атомарного вуглецю, наприклад

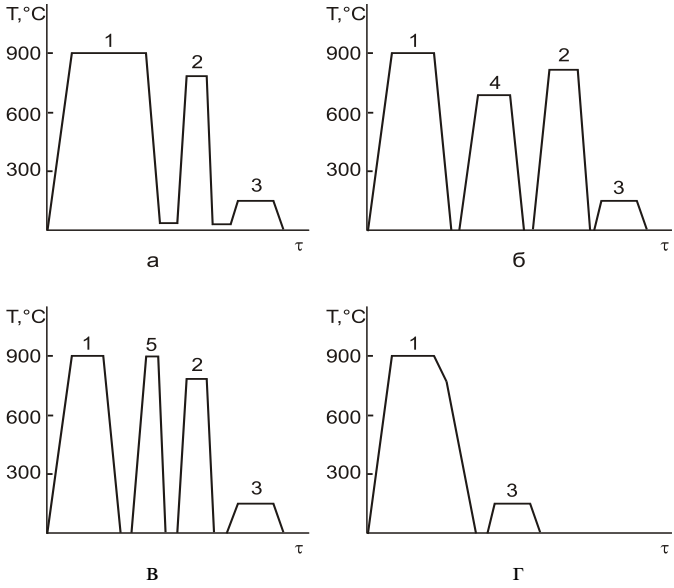
$$CH_4 \rightarrow C_{am} + 2H_2 .$$

Газова цементація має такі переваги порівняно з цементацією у твердому карбюризаторі: можливість механізації і автоматизації процесу цементації; активний контроль і регулювання процесу насичення; менша тривалість процесу, тому що виключається прогрівання ящиків з малотеплопровідним карбюризатором, можливе створення агрегатів для проведення повного циклу ХТО.

Після цементації вміст вуглецю максимальний на поверхні виробів і потім плавно знижується по глибині шару до вхідної концентрації. Структура різних зон деталей після цементації залежить від швидкості охолодження, концентрації вуглецю і хімічного складу сталі. Після повільного охолодження структура близька до рівноважної: в заевтектоїдній зоні шару – перлит із примежовою сіткою вторинного цементиту; у евтектоїдній – перлит, у доевтектоїдній – перлитно-

феритна при зростанні частки фериту у напрямку до серцевини. Зазначені структури мають порівняно низьку твердість і зносостійкість. Це означає, що одного насичення до високого вмісту вуглецю недостатньо для одержання необхідних експлуатаційних властивостей. Вони досягаються лише після наступної термічної обробки – гартування і низькотемпературного відпуску. При тривалих витримках в процесі цементації поряд з насиченням відбувається ріст зерна як в шарі, так і в серцевині, що негативно позначається на ударній в'язкості, контактній і втомній міцності, опорі до крихкого руйнування. Тому термічна обробка цементованих деталей поряд з підвищенням твердості призначена для подрібнення зерна і поліпшення механічних властивостей.

В залежності від хімічного складу цементованої сталі, температури цементації, призначення деталей та інших факторів можлива низка режимів термічної обробки цементованих виробів (рис. 1.1).



1 – цементація; 2 – гартування від Ac_1+(20-30)°С; 3 – низькотемпературний відпуск; 4 – високотемпературний відпуск; 5 – гартування (нормалізація) від Ac_3+(30-50)°С

Рисунок 1.1 – Графіки ХТО і ТО деталей із цементованих сталей

Структура цементованого шару після термічної обробки – відпущений мартенсит з карбідами і залишковим аустенітом (менше 15%); серцевина вуглецевих сталей – феритно-перлитна, легованих – маловуглецевий відпущений мартенсит, троостомартенсит чи ферит з маловуглецевим мартенситом. Після ХТО твердість поверхні цементованих деталей ≥HRC 58, серцевини (в залежності від товщини виробів, хімічного складу сталі і структури) – HRC 20...45.

Легувальні елементи в цементованих сталях. Основними легувальними елементами в цементовних сталях є Cr, Mn, Ni, поряд з якими в невеликих кількостях вводяться Ti, V, Mo, W, B. Карбідоутворювачі Ti, V, Mo, W і в найбільш сильній мірі Mn і Cr підвищують, а некарбідоутворювачі Ni і Si знижують поверхневу концентрацію вуглецю. Підвищення енергії активації Q дифузії атомів вуглецю в аустеніті під впливом практично всіх легувальних елементів зменшує швидкість насичення. Виключення складають Cr і Mn, що знижують термодинамічний потенціал вуглецю в аустеніті і сприяють підвищенню швидкості цементації. Карбідоутворювачі знижують схильність сталей до перегріву. Спадково-дрібнозернисті сталі з Ti, V, W застосовують для безпосереднього гартування з цементаційного нагрівання після декотрого підстужування (див. рис. 1.1, г).

Легувальні елементи, що підвищують стійкість переохолодженого аустеніту, знижують критичну швидкість гартування, збільшують прогартовуваність сталі і дозволяють використовувати як охолоджувачі олію чи повітря, зменшувати термічні напруження та жолоблення деталей. Легувальні елементи знижують температури Мп і Мк, збільшують кількість залишкового аустеніту в шарі.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Засвоїти основні процеси, що відбуваються при хіміко – термічній обробці, класифікацію різновидів ХТО.
2. Вивчити призначення та особливості цементації із використанням різних карбюризаторів, параметри процесів ХТО цементовних сталей та чинники, що впливають на кількісні та якісні показники цементованих виробів.
3. В стислій формі в звіті викласти відповіді до п. 1 та 2.
4. Підготувати до заповнення табл. 1.1 та 1.2.

Контрольні питання

1. Призначення ХТО і її переваги та недоліки в порівнянні з об'ємною термічною обробкою.

2. Вплив температури насичення, часу витримки, хімічного складу сталі на глибину дифузійного шару.

3. Процеси, що відбуваються при ХТО.

4. Сутність цементації, температури процесу, оптимальна поверхнева концентрація вуглецю. Способи цементації.

5. Сталі, що застосовують для цементації. Термічна обробка деталей після цементації; структура і властивості поверхні і серцевини після цементації і подальшої термічної обробки.

6. Призначення легувальних елементів в цементовних сталях.

Порядок виконання роботи

1. Зразки зі сталей марок 10 і ДИ3А (14ХГСН2МАШ) відповідно до технологічних прийомів цементації у твердому карбюризаторі запакувати в муфель і завантажити в піч на цементацію.

2. Після насичення на глибину 0,9...1,1 мм зразки витягти з муфеля й остудити на повітрі. По надрізу зруйнувати зразки, одну частину кожного зразка загартувати з оптимальних температур, а іншу залишити в цементованому стані.

3. Приготувати шліфи, звернувши увагу на видалення з торця цементованого шару. Вивчити мікроструктуру поверхневого шару і серцевини на зразках після цементації і цементації + гартування. Визначити глибину шару як суму заевтектоїдної, евтектоїдної і половини перехідної (доевтектоїдної) зони. Виміряти твердість серцевини і поверхні зразків. Результати випробувань занести в табл. 1.1.

4. На клиноподібному зразку зі сталі 10 після цементації, термічної і механічної обробок визначити пошарову твердість. Кожним 10 мм по горизонталі клиноподібного зразка відповідає віддалення від поверхні на 0,3 мм.

Зміст звіту

1. Описання призначення і сутності цементації, впливу технологічних параметрів на хід процесу цементації, обґрунтування варіанту термічної обробки цементованих деталей.

2. Схеми мікроструктур цементованих зразків. Пояснення отриманих експериментальних даних.

3. Графік «HRC – відстань від поверхні», заповнена табл. 1.1.
4. Висновки по роботі.

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень структури і твердості

Марка сталі	Технологія цементації	Після охолодження на повітрі				Термічна обробка	Після термообробки			
		Структура (описати)		Твердість, HRC			Структура (описати)		Твердість, HRC	
		шару	серцев.	поверхні	серцев.		шару	серцев.	поверхні	серцев.
10	920...940°С, 6 год., охолод. повітря					Гартування від 780°С, вода, відпуск 180°С				
14ХГСН2МАШ	920...940°С, 6 год., охолод. повітря					Гартування від 820°С, масло, відпуск 250°С				

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТИПОВИХ ВИРОБІВ ЗА РІЗНИМИ КРИТЕРІЯМИ

Мета роботи: навчитися аналізувати вибір матеріалів для різних виробів на підставі відносної маси виробів, питомої міцності та вартості матеріалів із врахуванням вимог до надійності виробів та статистичних показників властивостей матеріалів.

Загальні положення

Зниження матеріалоємності виробів, вузлів машин та приладів, зменшення витрат матеріалів за умови забезпечення надійності та довговічності продукції завжди буде актуальною задачею машинобудування. Це дозволяє не лише отримати певні економічні переваги, але в багатьох випадках реалізувати конструкторські рішення. Матеріалоємність виробів в значній мірі визначається вибором матеріалу, який базується на співставленні властивостей матеріалів, їх відповідності умовам експлуатації, врахуванні змін структури, хімічного складу та властивостей впродовж експлуатації. Подібний підхід використовувався і при вирішенні навчальних задач в курсових проектах із термічної обробки, спеціальних сталей та сплавів ГТУ, в курсовій роботі із механічних властивостей матеріалів та конструкційної міцності виробів.

Подібний спеціальний підхід до вибору матеріалів повинен бути доповнений кількісними оцінками оптимальності вибору матеріалу при одночасному урахуванні технології виготовлення виробу, в тому числі і термічної обробки. Системний підхід до виробу, що характеризується певним призначенням, дозволяє здійснити вибір варіанта, котрий забезпечує найвищу ступінь його ефективності [11].

Оптимізація вибору матеріалу із врахуванням надійності виробу. Надійність виробів – це складна властивість, що характеризує безвідмовність, здатність до тривалого зберігання, ремонтопридатність. Надійність залежить від багатьох чинників, тому в більшості випадків оцінюється імовірнісними характеристиками. Так, наприклад, безвідмовність визначається як імовірність того, що дія (механічна, теплова, хімічна і т.ін.), що може виникнути в процесі експлуатації та викликати відмову, не перевищує здатності виробу протистояти появі відмови:

$$P = імов(R > Q) = імов[(R - Q) = z > 0],$$

де R – несівна здатність виробу (здатність об'єкта зберігати під час дії навантаження стан, що відповідає його функціональному призначенню);

Q – експлуатаційне (в тому числі і екстремальне) навантаження;

z – функція роботоспроможності виробу ($z > 0$ – обов'язкова умова роботоспроможності).

В загальному випадку несівна здатність виробів та експлуатаційні навантаження залежать від багатьох чинників і тому мають випадковий характер. Вони можуть бути:

– випадковими величинами;

– функціями випадкових величин;

– випадковими функціями.

Несівна здатність безумовно пов'язана із властивостями матеріалів. На рис. 2.1 представлено узагальнену схему для її визначення в межах моделі надійності.

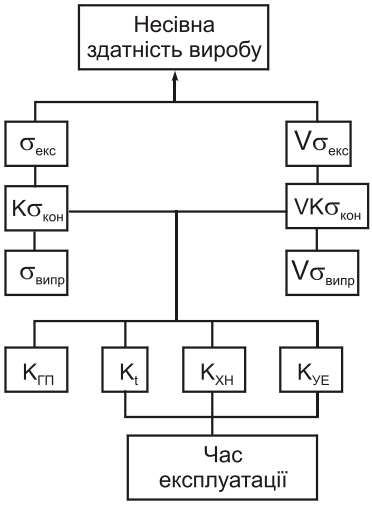


Рисунок 2.1 – Чинники, що впливають на несівну здатність виробів

На схемі: $\sigma_{випр}$ та $\sigma_{екс}$ – значення граничних напружень при стандартних випробуваннях та експлуатаційних навантаженнях; $K\sigma_{кон}$ –

коефіцієнт концентрації напружень; *K* – коефіцієнт (ступінь) впливу відповідно: *ГП* – геометричних параметрів; *t* – температури випробувань; *ХН* – характеристики навантажень; *УЕ* – умов експлуатації (вологість повітря, радіація, агресивне середовище, тощо); *V* – коефіцієнт варіації відповідних напружень.

Коефіцієнт варіації визначається на підставі статистичної обробки експериментальних даних:

$$V = \frac{\sigma}{\overline{X}},$$

де σ – середнє квадратичне відхилення;

$\overline{X}$ – середнє значення параметра.

У випадку оптимізації вибору матеріалу із врахуванням надійності виробу можливі наступні варіанти:

– мінімум маси (вартості) при заданій надійності;

– максимум надійності при постійній масі;

– мінімум вартості та маси одночасно при постійній надійності;

– максимум надійності та мінімум вартості одночасно при постійній масі.

У випадку, коли випадкові значення навантажень та здатність виробів нести навантаження розподіляються за нормальним законом і кореляції між ними немає, то для визначення імовірності слід використати таблиці нормального розподілу. Тоді імовірність $P=F_0(Y)$, де F_0 – табульована функція нормального розподілу; $Y = \frac{\overline{R} - \overline{Q}}{\overline{R} - V\sigma}$, де $\overline{R}$ та $\overline{Q}$ – середні значення несівної здатності виробу та навантаження (напруження); $V\sigma$ – коефіцієнт варіації напруження.

Величина $Y=2$, $Y=3$ при імовірності безвідмовної роботи виробу $P=0,977$, $P=0,999$ відповідно. Напруження, що відповідає втраті роботоспроможності матеріалу, визначається за рівнянням:

$$\sigma_p = \sigma_1\left(1 - Y \cdot V\sigma_1\right),$$

де σ_1 – прийнята в розрахунках границя плинності, повзучості, тривалої міцності і т.ін.;

$V\sigma_1$ – коефіцієнт варіації границі плинності, повзучості, тривалої міцності і т.ін., в частках.

Із наведеного рівняння можна зробити дуже суттєвий висновок: чим менше значення коефіцієнта варіації характеристик міцності, чим стабільніше значення міцності, тим більша абсолютна величина напруження σ_p. В табл. 2.1 наведено значення коефіцієнта варіації границі міцності та границі плинності для деяких матеріалів.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти варіації ($V\sigma_i$) границі міцності та границі плинності різних матеріалів

Матеріал		Сталі середньо-вугл. малолеговані	Сталі високоміцні середньолеговані	Сплави на основі Al	Сплави на основі Ti	Композ. матеріали	Пластмаси	Кераміка
Коефіцієнт варіації (в частках)	Границя міцності	0,04... 0,05	0,04... 0,05	0,05	0,04... 0,05	0,05... 0,11	0,06... 0,08	0,07... 0,08
	Границя плинності	0,03... 0,04	0,03... 0,04	0,04	0,03... 0,04	0,08... 0,1	0,05... 0,07	0,05... 0,07

Один із найчастіше використовуваних варіантів оптимізації вибору матеріалів є мінімізація маси виробу за умови заданого рівня надійності. Для цього розглядається декілька матеріалів і дані по кожному з них заносяться в табл. 2.2.

Оптимізація вибору матеріалу за показниками їх механічних та фізичних властивостей. У кожному конкретному випадку такий вибір повинен проводитись за характерним показником. Для конструкційних матеріалів найбільш типовими є характеристики міцності, пластичності, ударної в'язкості, границі витривалості тощо. Абсолютний рівень властивостей конкретного матеріалу не може в повній мірі визначити доцільність використання цього матеріалу, тому що він не

обумовлює отримання мінімальної маси виробу. Масова характеристика виробу безпосередньо пов'язана із витратами на матеріал та енергетичними затратами в процесі експлуатації.

Таблиця 2.2 – Оптимізація вибору матеріалу за мінімумом маси виробу (при *P=const*)

Матеріал	Густина, кг/м^3	Визначальна характеристика матеріалу[1]	Коефіцієнт варіації, % ($V\sigma_i \cdot 100\%$)	Еквівалентний розмір, мм; мм^2	Маса виробу, кг	Відносна маса[2]

Примітки:

1. Визначальна характеристика – головна механічна властивість матеріалу виробу, котра використовується при обґрунтуванні вибору матеріалу.

2. Визначається як відношення m_i/m_{min}, де m_{min} – маса найлегшого виробу.

У зв'язку із зазначеним вибір матеріалу доцільно проводити за питомими показниками, наприклад, питомою границею міцності, питомою границею плинності, питомою границею тривалої міцності:

$$K_{o_i} = \sigma_i / (\rho_i \cdot q),$$

де K_{o_i} – і-та характеристика питомої міцності;

σ_i – і-та характеристика міцності, Н/мм^2; МПа;

ρ_i – густина матеріалу, кг/м^3; q = 9,81 м/с^2.

Отримані дані для різних матеріалів найліпше заносити в табл. 2.3.

Для визначення питомих характеристик міцності із врахуванням надійності виробів та розсіювання властивостей матеріалів використовують рівняння:

$$K_{p_i} = \sigma_i (1 - Y \cdot V\sigma_i) / (\rho_i \cdot q) = K_{o_i} (1 - Y \cdot V\sigma_i).$$

Таблиця 2.3 – Результати оптимізації вибору матеріалу за питомими показниками міцності

Матеріал	Густина ρ, кг/м^3	Характеристика міцності σ_i,	Коефіцієнт варіації характеристики міцності $V\sigma_i$ (в частках)	Питома характеристика міцності K_o, км	Питома характеристика міцності із врахуванням надійності та розсіювання властивостей $K_р$, км	
					P=0,977; Y=2	*P=0,999; Y=3*

Аналіз табл. 2.3 дозволяє зробити декілька важливих висновків:

1. Оптимізація вибору матеріалу здійснюється на комплексній багатокритеріальній основі.

2. Коректним буде вибір заснований на обов'язковому врахуванні вимог до надійності виробів та коефіцієнта варіації характеристики міцності.

Оптимізація вибору матеріалу з врахуванням його вартості. Відомо, що вартість матеріалу залежить від багатьох чинників, серед яких важливе значення мають хімічний склад, технологія отримання півфабрикатів, обробка поверхні, технологія отримання виробів і т.ін. Однієї вартості при виборі матеріалу недостатньо, тому що матеріали відрізняються за властивостями (це впливає на розміри та масу виробів), за густиною. Тому пропонується враховувати:

а) вартість матеріалу C_i, грн./кг;

б) вартість матеріалу, що витрачається на виготовлення одного виробу $C_i^{'}$, грн./шт.:

$$C_i^{'} = C_i \cdot m_i$$

де m_i – маса виробу із і-го матеріалу;

в) питома вартість $C_{пит}$ одного виробу, що припадає на одиницю міцності, грн./(шт·МПа):

$$C'_{пит_i} = \left(C_i' \Big/ \sigma_{0,2_i} \right)$$

або

$$C''_{пит_i} = \left(C_i' \Big/ \sigma_{B_i} \right)$$

Питома вартість підкреслює доцільність використання зміцнювальної термічної обробки. Так, наприклад, при використанні сталі без термічної обробки виробів за умов:

$$C_i = 3{,}6 \text{ грн/кг}; \quad m_i = 2{,}4 \text{ кг/шт}; \sigma_{0,2} = 395 \text{ МПа}$$

$$C_{пит}' = \left(C_i \cdot m_i \big/ \sigma_{0,2} \right) = \left(3{,}6 \cdot 2{,}4 / 395 \right) = 21{,}87 \cdot 10^{-3} \text{ грн} / \left(\text{шт} \cdot \text{МПа} \right)$$

Внаслідок використання термічної обробки зростуть характеристики міцності, зменшиться маса виробу та питома вартість. За умови, що:

$$m_i = 1{,}7 \text{ кг/шт}; \ \sigma_{0,2} = 900 \text{ МПа}$$

$$C_{пит}' = \left(3{,}6 \cdot 1{,}7 / 900 \right) = 6{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ грн} / \left(\text{шт} \cdot \text{МПа} \right).$$

Отриманні результати слід занести в табл. 2.4 та проаналізувати.

Таким чином, проаналізувавши дані таблиць 2.2–2.4 приймають рішення щодо оптимізації вибору матеріалу для конкретного виробу.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Описати основи оптимізації вибору матеріалу для конкретного виробу.

2. Отримати від викладача завдання і підготувати вихідні дані для його виконання.

Таблиця 2.4 – Оптимізація вибору матеріалу із врахуванням його відносної вартості

Матеріал	Ціна C, грн./кг	Густина ρ, кг/м^3	Міцність, МПа		Вартість матер. для одного виробу C_i', грн./шт	Питома вартість	
			$\sigma_{0,2}$	σ_B		C'_{num_i}, грн./(шт·МПа)	C''_{num_i}, грн./(шт·МПа)

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте основні показники механічних властивостей котрі використовують при виборі матеріалів для виготовлення пружин, зубчатих коліс, валів, лопаток турбін ГТУ, вальниць.

2. Як визначається коефіцієнт варіації границі міцності, плинності, ударної в'язкості ? Які чинники впливають на величину коефіцієнта варіації ?

3. Що таке надійність виробів і які чинники впливають на неї ?

4. Охарактеризуйте сутність несівної здатності виробу та чинників, що на неї впливають.

5. Як визначати еквівалентний розмір виробу, від чого він залежить ?

6. Як впливає термічна обробка на величину коефіцієнта варіації границі міцності, плинності, витривалості ?

7. Які вимоги висувають до технології виготовлення виробів, в тому числі і термічної обробки, котрі спрямовані на підвищення надійності виробів ?

8. На які характеристики, яким чином і чому впливають значні розсіювання властивостей матеріалів ? Наведіть відповідні рівняння та поясніть їх.

9. Наведіть перелік основних чинників, що впливають на вартість конструкційних та інструментальних матеріалів. Охарактеризуйте кожен із них.

10. Як визначаються та що характеризують питомі вартості матеріалів ? Як і чому впливає термічна обробка сталей та сплавів на їх величину ?

Порядок виконання роботи

1. За підготовленими вхідними даними (підрозділ «Завдання на підготовку до лабораторної роботи») виконати відповідні розрахунки, передбачені табл. 2.2–2.4.

2. Отримані дані занести в табл. 2.2–2.4.

3. Підготувати ґрунтовну інформацію щодо матеріалів, які пропонуються для виготовлення заданого виробу (властивості, густина, вартість, технологія отримання півфабрикатів та виробів, тощо).

4. На підставі отриманих вихідних даних та табл. 2.2–2.4 прийняти оптимальне рішення щодо вибору матеріалу.

Зміст звіту

1. Основні поняття із оптимізації вибору матеріалу на підставі комплексного підходу.

2. Характеристика виробу, вимоги до матеріалу виробу, властивості запропонованих матеріалів.

3. Заповнені табл. 2.2–2.4, аналіз даних таблиць, обґрунтований вибір матеріалу.

4. Висновок по виконаній роботі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3
ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ТА РОЗМІРІВ ВИРОБІВ ПРИ ЇХ ЗБЕРІГАННІ, ВИПРОБУВАННЯХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета роботи: на підставі виконання конкретних завдань отримати навички у визначенні змін розмірів виробів, структури та властивостей матеріалів при зберіганні, випробуванні та експлуатації.

Загальні відомості

При обґрунтуванні вибору матеріалів, технології виготовлення виробів значну увагу приділяють питанням забезпечення стабільності хімічного складу, структури, властивостей матеріалів, стабільності розмірів виробів впродовж усього циклу їх існування (цикл існування – це час від останньої технологічної операції до виведення виробу із експлуатації (відправка у брухт)) [7, 8, 11, 13].

Зміна хімічного складу матеріалу. Вона відбуваються під дією робочого середовища, в якому матеріал знаходиться тривалий час. Так, наприклад, при експлуатації в повітряному середовищі відбуваються зневуглецювання, знелегування, окислення, зменшення вмісту в твердому розчині легувальних елементів, що надають йому захисних функцій. Як приклади: зменшення вмісту алюмінію в γ-твердому розчині в процесі експлуатації нижче 8% призводить до високотемпературної корозії; локальне збіднення α- та γ-твердого розчину на хром (<13%) призводить до локального корозійного руйнування сталі.

У випадку експлуатації виробів при високих температурах та низьких тисках (у вакуумі) хімічний склад сплавів змінюється внаслідок сублімації (через низький парціальний тиск) хрому, марганцю тощо. У разі тривалого нагрівання сталей та сплавів в навуглецювальному середовищі слід враховувати можливість збільшення вмісту в сплавах вуглецю, частки карбідів, та, як наслідок, зміни хімічного складу матриці. Як відомо, ефективним заходом проти навуглецювання високожаростійких сплавів є введення до їх складу алюмінію (наприклад, сталі 0Х23Ю5Т, Х15ЮТ, сплав ХН60Ю3), котрий не лише створює щільну, дифузійно малопроникну плівку, але й змінює термодинамічний потенціал вуглецю в α- або γ-твердому розчині.

Зміни хімічного складу матеріалів в період зберігання можливі за умови взаємодії компонентів середовища та матеріалів. Наприклад, при зберіганні виробів із порошкових матеріалів можливе їх збагачення киснем, воднем, азотом, вологою. Завдяки високій активності титану та його сплавів при зберіганні можливе газонасичення.

Зміни хімічного складу пластмас та композиційних матеріалів на їх основі обумовлені дією підвищених температур, радіаційного (в тому числі, і природного) опромінювання, дії робочого середовища та часу. Це призводить до вилучення, в першу чергу, летких компонентів з пластмас, які входять до групи пластифікаторів та компонентів, що реагують із робочим середовищем.

Зміни структури та властивостей. Що стосується пластмас, то слід зважити на протікання таких процесів, як деструкція, полімеризація, поліконденсація під дією температури, середовища, навантажень, а досить часто – внаслідок одночасної дії зазначених чинників. Це призводить до зміни фазового складу, підвищення частки кристалічної складової, окрихчення, зменшення еластичності, утворення мікротріщин.

В конструкційних сталях, призначених для холодного штампування, зміни при зберіганні можливі внаслідок деформаційного старіння, закріплення дислокацій та появи зуба плинності на діаграмі деформації. Внаслідок того, що холодноштамповані вироби після витягування, видавлювання, об'ємної штамповки, як правило, не піддаються наступній термічній обробці, структура характеризується підвищеною густиною дислокацій, сталь – пониженою корозійною стійкістю, в'язкістю, пластичністю. У випадку надійного захисту від корозії та відсутності пластичної деформації під час експлуатації при нормальних атмосферних умовах структура та властивості будуть залишатися незмінними.

Максимальні температури експлуатації цементованих (нітроцементованих) сталей зазвичай не перевищують температуру відпуску і тому зміни в мікроструктурі досить тонких поверхневих шарів будуть обумовлені циклічною зміною контактних напружень. Ресурс таких виробів залежить від циклічної довговічності при діючих значеннях напружень.

У випадку важконавантажених виробів в контактних (приповерхневих) шарах можуть розвиватися температури, що перевищують температури відпуску та теплостійкість використаних сталей. Як на-

слідок, відбуваються розпад мартенситу, зменшення твердості, міцності, контактної витривалості та границі витривалості матеріалів, зношення та втрати розмірів виробів.

Зміна розмірів виробів в процесі зберігання, експлуатації. Розмірна стабільність виробів в деяких випадках забезпечує точність верстатів, приладів, механізмів, надійність роботи вузлів. Зміна розмірів виробів може бути обумовлена:

– структурною нестабільністю та релаксацією залишкових напружень;

– релаксацією робочих експлуатаційних напружень, одним із проявів якої є повзучість;

– зношенням, в тому числі і корозійним, внаслідок комплексної дії різноманітних чинників.

Основною характеристикою розмірної стабільності є прецизійна границя пружності $\sigma_{0,0001}$, котра характеризує опір матеріалу мікропластичності і оцінюється за величиною напруження, при якому після розвантажування зразка залишкове відносне видовження становить $(1...2)\cdot 10^{-6}$ *(0,0001...0,0002%)*.

При виборі матеріалів для деталей, що експлуатуються при підвищених температурах, розмірну стабільність слід оцінювати за границею повзучості та швидкістю повзучості. Остання характеристика за відомих t, τ, σ та залежності $v_n = A\cdot\sigma^m$ дозволяє розрахувати зміну розмірів виробів $v_n = \delta/\tau$; $\delta = v_n \cdot \tau$ і при $v_n = 0,2/1000$ та $\tau = 1000$ год:

$$\delta = \frac{0,2}{1000}\cdot 1000 = 0,2\%.$$

Наприклад, при початковій довжині $l_0 = 200$ *мм*, абсолютне видовження виробу Δl досягне $\Delta l = \dfrac{\delta \cdot l_0}{100} = \dfrac{0,2\cdot 200}{100} = 0,4$ *мм*.

В тому випадку, коли деталі з'єднувалися по пресовій посадці, збільшення розмірів охоплюючої деталі може призвести до зміни посадки та зниженню надійності вузла.

Інтенсивність (швидкість) зміни розмірів внаслідок зношення залежить від багатьох чинників і в більшості випадків визначається експериментально. Руйнування від корозії (швидкість корозії) зале-

жить від хімічного складу матеріалу, складу та температури робочого середовища. В [42] наведено шкалу балів корозійної стійкості металів та сплавів та інтервали швидкості корозії. Наприклад, досконало стійкі сплави (1 бал) кородують зі швидкістю *< 0,001 мм/рік*, стійкі (5 бал) *– 0,05...0,1 мм/рік*, нестійкі (10 бал) *– > 10 мм/рік*. Ці дані можуть бути використані для оцінки зміни міцності конструкції в часі та її граничного ресурсу при заданій товщині заготовки.

Прогнозування зміни структури, властивостей матеріалів, розмірів виробів може бути здійснено як на кількісному, так і якісному рівнях.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати матеріал щодо технологічних заходів по підвищенню стабільності розмірів виробів – складових елементів вимірювальних приладів, високоточних верстатів тощо. Повторити теоретичний матеріал із дисциплін «Високотемпературна корозія матеріалів ГТУ», «Хімія металів», «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів», що тісно пов'язані із даною лабораторною роботою. Засвоїти методи розрахунків втрати маси, зміни розмірів, конструкційної міцності, граничного зношення виробів в процесі експлуатації.

Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Наведіть основні чинники, що впливають на зміну структури та властивостей матеріалів в процесі зберігання виробів.

2. Які умови зберігання виробів, що виготовлені із пластмас, гум, кераміки, органічного скла, сплавів, регламентуються в технічних паспортах ?

3. Наведіть перелік та охарактеризуйте основні чинники, що впливають на зміну розмірів виробів при їх зберіганні.

4. Яке призначення в технологіях виготовлення виробів додаткової стабілізаційної термообробки (відпалу, відпуску) ?

5. Наведіть та поясніть основні чинники, що впливають на зміну структури та властивостей матеріалів в процесі експлуатації; на стабілізацію структури та властивостей матеріалів в процесі експлуатації.

6. Зв'язок між теплостійкістю, жаростійкістю, червоностійкістю, жароміцністю та стабільністю структури і властивостей.

7. На підставі яких даних прогнозують зміни розмірів виробів в процесі експлуатації?

8. Наведіть та поясніть основні напрямки забезпечення розмірної стабільності виробів в процесі експлуатації.

9. Вплив легування, термічної обробки, фазового складу матеріалів на їх розмірну стабільність в процесі експлуатації.

Порядок проведення лабораторної роботи

Отримати від викладача індивідуальне завдання, в якому зазначені назва виробу, рекомендовані матеріали, середовища, умови зберігання та експлуатації. Із використанням довідникових матеріалів розробити прогнози щодо зміни хімічного, фазового складу, структури, властивостей матеріалів, розмірів та маси виробів. На підставі отриманих даних розробити рекомендації щодо заміни матеріалу, експлуатаційних параметрів, рівня дійсних напружень у виробах.

Зміст звіту

Дані про розглянуті вироби, матеріали, робочі середовища, експлуатаційні параметри виробів. Графіки, таблиці, стовбчасті діаграми за отриманими залежностями, результати розрахунків, висновок, рекомендації.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4
СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Мета роботи: На підставі виконання конкретних завдань освоїти основи статистичних методів аналізу технологічних процесів.

Загальні відомості

Статистичні методи управління якістю продукції порівняно із суцільним контролем виробів мають таку важливу перевагу, як можливість виявлення відхилень від оптимального технологічного процесу не тоді, коли вся партії деталей виготовлена, а в процесі виробництва.

Основні складові статистичних методів управління якістю продукції представлено на рис. 4.1.

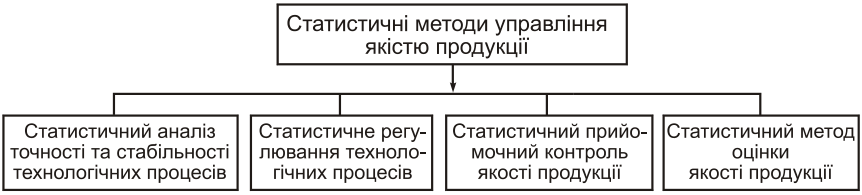


Рисунок 4.1 – Статистичні методи управління якістю продукції

В даній роботі вивчається сутність перших двох складових серед зазначених на рис. 4.1 статистичних методів.

Статистичний аналіз точності технологічного процесу – це установлення статистичними методами значень показників точності технологічного процесу. Статистичний аналіз передбачає дослідження чинників та умов, що впливають на якість. Він включає аналіз видів та причин дефектів, аналіз впливу окремих чинників технологічних процесів на показники якості [6, 7, 9, 10].

Статистичний аналіз точності технологічного процесу. При здійсненні аналізу технологічного процесу досить ефективним способом є графічна обробка експериментальних даних. Візуалізація за допомогою стовбчастих діаграм (гістограм) допомагає розібратися в стані якості виробів у генеральній сукупності, виявити в ній положення середнього значення та характер розсіювання.

Відомо, наприклад, що в процесі термічної обробки у виробах виникає деформація і від її величини та розсіювання залежать затрати на завершальне шліфування (механічне оброблення) виробів. Якщо розсіювання стабільне та незначне, технологічними заходами можна нанівець звести завершальне механічне оброблення. Як приклад розглядається технологічний процес термічної обробки, після якого визначаються абсолютна (мм) та відносна (у відсотках) деформація виробів. Результати цих вимірювань занесено в табл. 4.1.

В загальному випадку може досліджуватись твердість, границя міцності, ударна в'язкість і т.ін. *Число рекомендованих вимірювань N – в межах 100, але не менше 50*.

Таблиця 4.1 – Відносна деформація виробів після термічної обробки, %

0,9	1,5	0,9	1,1	1,0	0,9	1,1	1,1	1,2	1,0
0,5	0,1	0,7	0,8	0,7	0,8	0,5	0,8	1,2	0,6
0,5	0,8	0,3	0,4	0,5	1,0	1,1	0,6	1,2	0,4
0,6	0,7	0,5	0,2	0,3	0,5	0,4	1,0	0,5	0,8
0,7	0,8	0,3	0,4	0,6	0,7	1,1	0,7	1,2	0,8
0,8	1,0	0,6	1,0	0,7	0,6	0,3	1,2	1,4	1,0
1,0	0,9	1,0	1,2	1,3	0,9	1,3	1,2	1,4	1,0
1,4	1,4	0,9	1,1	0,9	1,4	0,9	1,8	0,9	1,4
1,1	1,4	1,4	1,4	0,9	1,1	1,4	1,1	1,3	1,1
1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8	1,5

Отримані і занесені в табл. 4.1 значення після їх попередньої обробки переносять в бланк реєстрації (табл. 4.2). Для цього:

1. Серед отриманих значень (табл. 4.1) знаходять максимальне та мінімальне значення $x_{max}=1,8\%$; $x_{min}=0,1\%$.

2. Визначають розмах (широту розподілу) $R = x_{max} - x_{min}=1,8 - 0,1 = 1,7\%$.

3. Визначають кількість інтервалів K та ширину інтервалу h:

$$K = \sqrt{N} = \sqrt{100} = 10\,,\ h = R/K = 1,7/10 = 0,17\,,$$

після округлення приймають ширину інтервалу $h = 0,2$.

4. Встановлюють границі значення інтервалів.

Найменше граничне значення для першого інтервалу визначають:

$$x_{min} - \frac{одиниця\ вимірювань}{2} = 0,1 - \frac{0,1}{2} = 0,05\%,$$

де «*одиниця вимірювань»* становить 0,1% відносної деформації.

Найбільше значення першого інтервалу знаходять після додавання до найменшого граничного значення ширини *h=0,2%*:

$$0,05 + 0,20 = 0,25\%.$$

Таким чином, ширина першого інтервалу: 0,05…0,25%. Ширина другого інтервалу становить 0,25…(0,25+0,2), тобто 0,25…0,45%. Подібним чином розраховують ширину інших інтервалів.

5. Використовуючи табл. 4.1 визначають кількість значень, що потрапили в даний інтервал частоти та накопичені частоти і заповнюють табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Бланк реєстрації густини розподілу деформації

Назва виробу: *штанга*		Вимірювальний інструмент: *мікрометр*		Дата:
Характеристика, що вимірюється: *довжина*		Одиниці вимірювань: *мм (мкм)*		Величина партії штанг: *1000 шт.*
Показник якості термічної обробки: *відносна деформація, %*		Технологічний процес: *термічна обробка*		Кількість вимірюваних штанг: *100*
Інтервал	Значення середини інтервалу	Кількість виробів із відносною деформацією, що потрапили в інтервал	Частота *f*	Накопичена частота
1	2	3	4	5
0,05...0,25	0,15	2	2	2
0,25...0,45	0,35	8	8	10

Кінець таблиці 4.2

1	2	3	4	5
0,45...0,65	0,55	13	13	23
0,65...0,85	0,75	15	15	38
0,85...1,05	0,95	20	20	58
1,05...1,25	1,15	17	17	75
1,25...1,45	1,35	13	13	88
1,45...1,65	1,55	9	9	97
1,65...1,85	1,75	3	3	100

6. Будують гістограму розподілу (рис. 4.2).

По зображеному на гістограмі розподілу можна зробити висновок щодо стану технологічного процесу та, при необхідності, намітити заходи по його поліпшенню. На рис. 4.3 наведено приклади різних поєднань густини розподілу із полем допуску $T_н$ - $T_в$ (нижня та верхня границі допуску, значення вказані в завданні).

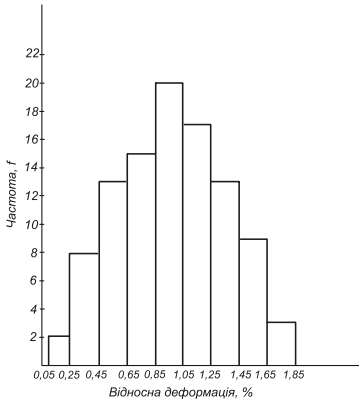


Рисунок 4.2 – Гістограма розподілу деформації штанг

На рис. 4.3, а форма розподілу задовільна, її ліва та права частини симетричні. Ширина розподілу складає близько ¾ поля допуску, центри розподілу та поля допусків співпадають. На підставі цього роблять висновок про задовільність технологічного процесу.

Схема розподілу на рис. 4.3, б відхилена праворуч, тому центр розподілу також зміщений. Є імовірність того, що серед неконтрольованих виробів можуть бути дефектні, що виходять за $T_в$. Слід відрегу-

лювати технологічний процес термічної обробки таким чином, щоб центр розподілу співпав із центром поля допусків.

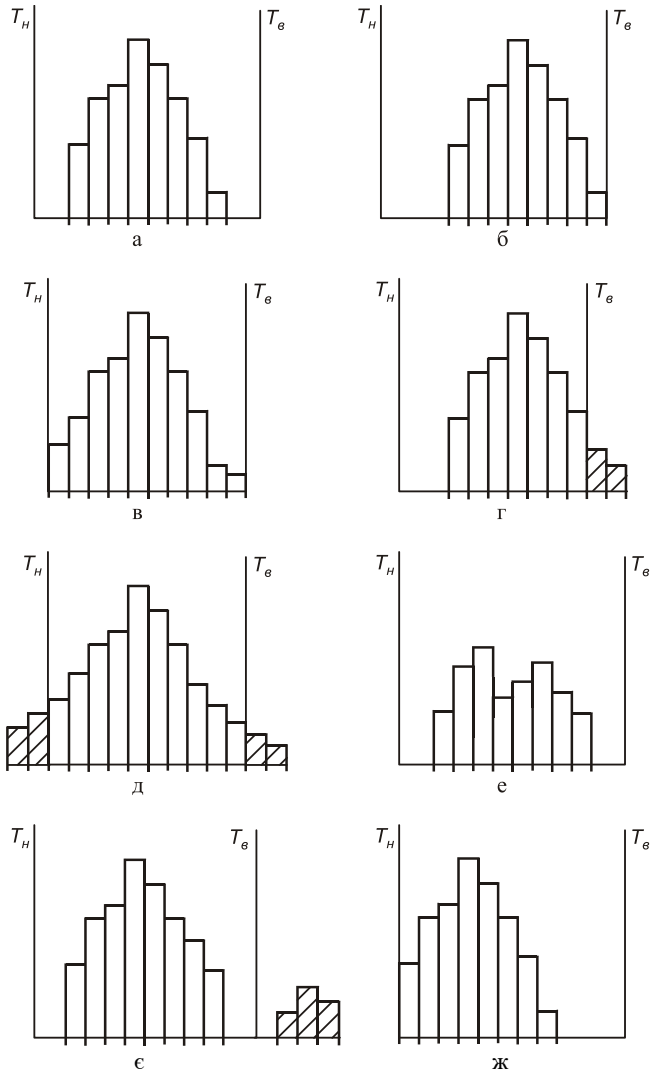


Рисунок 4.3 – Варіанти поєднання густини розподілу із полем допуску ($T_н$, $T_в$ – нижня та верхня границі допуску)

На рис. 4.3, в центр розподілу розташований вірно, але широта розподілу співпадає із широтою поля допуску. Тому можлива поява дефектних виробів. Щоб звузити широту розподілу необхідно: обстежити обладнання, пристосування, здійснити термометрування робочого простору, ретельно проконтролювати здійснення технологічного процесу і т.ін.

Коли центр розподілу зміщений (рис. 4.2, г), то це свідчить про наявність дефектних виробів і слід негайно вжити заходів: скорегувати технологічні параметри; перемістити центр розподілу в центр поля допуску; звузити широту розподілу.

У випадку, коли центр розподілу співпадає із центром поля допуску, але широта поля допуску менше широти розподілу (рис. 4.3, д), можна виявити дефектні вироби по обидві сторони допуску. Необхідно внести зміни в технологічний процес для звуження розсіювання та запобігання появі дефектних виробів.

На рис. 4.3, е розподіл має два піка, що можна пояснити наступними причинами:

– вироби виготовлені із різних матеріалів;

– відбулись зміни параметрів технологічного процесу партії виробів;

– в одну контрольовану партію об'єднали вироби, що оброблялись на різному обладнанні.

Головна частина розподілу на рис. 4.3, є – в нормі, але деяка частина виробів виходить за верхню границю допуску, утворює своєрідний острівець. Варіанти припущень: термічно оброблені дефектні вироби перемішали із якісними; для виготовлення частини виробів використали недоброякісний матеріал.

Гістограма на рис. 4.3, ж відображає випадки грубого порушення результатів при вимірюванні; відхилення від норми технологічних параметрів.

Наведені вище оцінки – якісні. Об'єктивно оцінювати гістограму та технологічний процес слід за кількісними показниками.

Середнє арифметичне $\overline{X}$ визначається

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot f_i),$$

де x_i – значення середини інтервалу;

f_i – частота кожного інтервалу.

Сума квадратів відхилень S визначається за рівнянням:

$$S = \sum \left(x_i - \overline{X}\right)^2 \text{ або } S = \sum x_i^2 - \frac{\left(\sum x_i\right)^2}{n}.$$

Сума квадратів відхилень характеризує розсіювання значень в усьому комплексі даних.

Дисперсія σ^2 – міра розсіювання на кожну одиницю даних:

$$\sigma^2 = \frac{S}{n} = \left\{ \sum x_i^2 - \frac{\left(\sum x\right)^2}{n} \right\} \Big/ n .$$

Середнє квадратичне відхилення σ:

$$\sigma = \sqrt{\frac{S}{n}} = \sqrt{\left\{ \sum x_i^2 - \frac{\left(\sum x\right)^2}{n} \right\} \Big/ n} .$$

Оцінка точності технологічних процесів. Після з'ясування форми та широти розподілу у співставленні із полем допуску, досліджують можливість виробництва якісних виробів за даним технологічним процесом, тобто за результатами дослідження *кількісно* оцінюють точність технологічних процесів. Для цього використовують коефіцієнт точності технологічного процесу K_m:

$$K_m = \frac{6\sigma}{T},$$

де σ – середнє квадратичне відхилення;

$T = T_в - T_н$ – допуск на контрольований параметр (значення $T_в$ та $T_н$ вказані в завданні).

На рис. 4.4 наведено варіанти розподілу контрольованих параметрів. У випадку: $K_m \le 0,75$ – технологічний процес точний задовільний, корегування не вимагає; $K_m = 0,76...0,98$ – технологічний процес вимагає уважного контролю та нагляду; $K_m > 0,98$ – точність технологічного процесу незадовільна, по обидві сторони поля допуску виявляють дефектні вироби. Необхідно негайно вжити заходів.

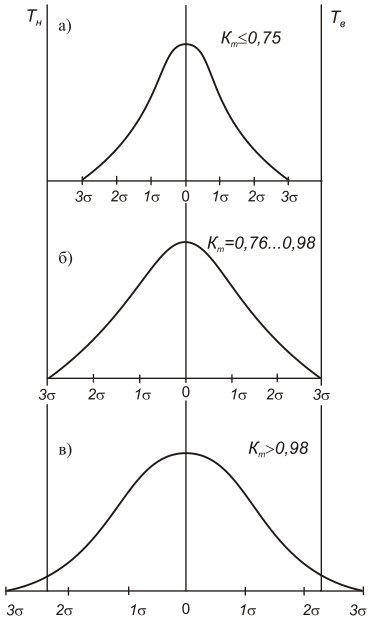


Рисунок 4.4 – Варіанти розподілу контрольованих параметрів за різних значень коефіцієнтів точності технологічних процесів K_m

Щоб разом із гістограмою побудувати криву нормального розподілу, її слід привести в той масштаб, в якому виконані гістограми та емпірична крива. Із урахуванням масштабу:

$$h'_1 = y \cdot \frac{n \cdot h}{\sigma},$$

де h'_1 – ордината кривої нормального розподілу;

y – табличні значення ординати для $\sigma = 1$;

h – широта інтервалу (по осі абсцис $h = \frac{R}{K}$; для прикладу, що розглядається, $h=0,2$).

Для побудови кривої нормального розподілу необхідно отримати допоміжні дані і заповнити табл. 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків допоміжних даних для визначення середнього арифметичного відхилення

№ інтервалу	Інтервал	Середина інтервалу	Частота f	U *(див. примітку)*	$f \cdot U$	$f \cdot U^2$
1	0,05...0,25	0,15	2	-4	-8	32
2	0,25...0,45	0,35	8	-3	-24	72
3	0,45...0,65	0,55	13	-2	-26	52
4	0,65...0,85	0,75	15	-1	-15	15
5	0,85...1,05	0,95	20	0	0	0
6	1,05...1,25	1,15	17	1	17	17
7	1,25...145	1,35	13	2	26	52
8	1,45...1,65	1,55	9	3	27	81
9	1,65...1,85	1,75	3	4	12	48
		Всього	100		9	369

Примітка: $U_i = \left(x_{i_{cp}} - x_0\right) / h$, де $x_{i_{cp}}$ – значення середини і-го інтервалу; x_0 – середина інтервалу із найбільшою частотою (в прикладі, що розглядається, $x_0 = 0,95$); h – широта інтервалу ($h = 0,2$).

За даними таблиці 4.3 визначимо:

- середнє значення:

$$\overline{X} = x_0 + \frac{\sum(f \cdot U)}{\sum f} \cdot h = 0,95 + \frac{9}{100} \cdot 0,2 = 0,97\%;$$

- сума квадратів відхилень:

$$S = h^2\left(\sum\left(f\cdot U^2\right) - \frac{\sum\left(f\cdot U\right)^2}{\sum f}\right) = 0{,}2^2\left(369 - \frac{9^2}{100}\right) = 14{,}7276\%;$$

- дисперсія:

$$\sigma^2 = \frac{S}{n} = \frac{14{,}7276}{100} = 0{,}1473\%;$$

- середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{S}{n}} = \sqrt{0{,}1473} = 0{,}384\%.$$

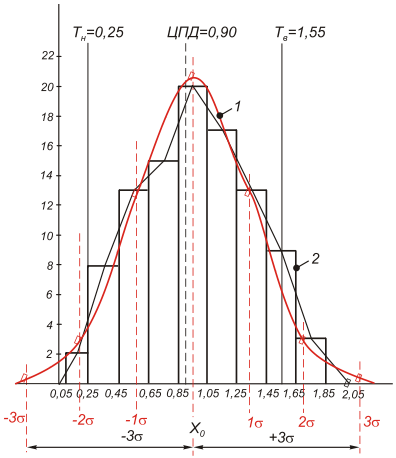
Таблиця 4.4 – Результати розрахунків допоміжних даних для побудови кривої нормального розподілу

x	$z = \frac{x}{\sigma}$	y	$h_1' = y\cdot\frac{n\cdot h}{\sigma}$
0	0	0,3989	20,8
±0,5σ	0,5	0,3521	18,3
±1,0σ	1,0	0,2420	12,6
±1,5σ	1,5	0,1295	6,7
±2,0σ	2,0	0,054	2,8
±2,5σ	2,5	0,0175	0,91
±3,0σ	*3,0*	*0,0044*	*0,23*

Примітка. y – табличне значення ординати для σ = 1; σ в даному прикладі дорівнює 0,384 %.

За даними табл. 4.3 та 4.4 будують гістограму та криву нормального розподілу (рис. 4.5).

Нормальний розподіл в даному випадку використовують як модель, тому що багато сукупностей вимірювань (результатів випробувань) має розподіл, що наближається до нормального. Із використанням таблиці функції нормального розподілу (додаток А) можна визначити величину або відсоток дефектних виробів.



ЦПД – центр поля допуску

Рисунок 4.5 – Крива нормального розподілу (лінія 1) та гістограма (лінія 2)

Якщо, наприклад, технологічний процес налагоджений і відомо, що $x_0 = 0{,}95\%$, $\sigma = 0{,}384\%$ із нормативно-технічних документів верхнє та нижнє значення дорівнюють 0,90±0,65, то

$$Тв = 0{,}90 + 0{,}65 = 1{,}55\%;\ \ Т_н = 0{,}90 - 0{,}65 = 0{,}25\%.$$

Визначимо відхилення верхнього та нижнього допустимих значень від середніх, кратних σ.

$$z_в = \frac{T_в - \bar{X}}{\sigma} = \frac{1{,}55 - 0{,}968}{0{,}384} = 1{,}515\ ,$$

$$z_н = \frac{T_н - \bar{X}}{\sigma} = \frac{0{,}25 - 0{,}968}{0{,}384} = -1{,}87\ ,$$

де

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i \times f_i) = \frac{1}{100}\left(\begin{array}{l} 0{,}15\times 2 + 0{,}35\times 8 + 0{,}55\times 13 + 0{,}75\times 15 + \\ +0{,}95\times 20 + 1{,}15\times 17 + 1{,}35\times 13 + 1{,}55\times 9 + 1{,}75\times 3 \end{array}\right) = 0{,}968$$

Згідно із таблицею ймовірності при $z_в$ = 1,516 (0,9357, додаток А) та $z_н$ = -1,87 (0,0307, додаток А). Потрапляння нормально розподіленої величини в інтервали – 1,87...0 та 0...1,515 відповідно дорівнюють: 0,5 - 0,0307 = 0,4693; 0,9357 - 0,5 = 0,4357.

Тому отримаємо наступні дані щодо оцінки точності технологічного процесу:

0,4693 + 0,4357 = 0,905 ≈ 90,5% виробів відповідають технічним вимогам;

0,500 - 0,4693 = 0,0307 ≈ 3,1% виробів мають деформацію нижче, ніж передбачену нижнім допуском;

0,500 - 0,4357 = 0,0643 ≈ 6,4% виробів мають деформацію, що перевищує верхній допуск.

Таким чином, близько 9,5% виробів будуть мати деформацію, що відхиляється від технічних вимог, тому цей технологічний процес характеризується низькою точністю.

Наведена методика дозволяє дати оцінку любому технологічному процесу термічної обробки, кількісно оцінити точність процесу, визначити значення параметрів та частку виробів, що вийшли за допустимі границі.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Стисло описати сутність статистичних методів аналізу точності технологічних процесів термічної обробки.

2. Навести методику обробки вибірки експериментальних даних та їх використання для статистичного аналізу.

Контрольні питання

1. Привести та проаналізувати основні складові статистичних методів управління якістю продукції.

2. Сутність та задачі статистичного аналізу точності технологічного процесу.

3. Викласти методику обробки вибірки експериментальних даних на підставі генеральної сукупності, побудови гістограм.

4. Навести та проаналізувати можливі варіанти поєднання густини розподілу із полем допуску.

5. Як визначається коефіцієнт точності технологічного процесу та які чинники на нього впливають.

6. Які заходи слід вжити, щоб зменшити значення $K_т$?

7. Які висновки можна зробити щодо точності технологічного процесу, якщо $K_т$ дорівнює: а) менше 0,6; б) 0,9; в) 1,0 ?

8. Як визначити нижню та верхню границі поля допуску на контрольований параметр якості термічної обробки ?

9. Як визначати частку виробів, параметри котрих вийшли за допустимі границі ?

10. Які заходи слід вжити при великих значеннях $K_т$ та частці дефектних виробів ?

Порядок виконання роботи

1. Отримати варіант завдання із вибіркою експериментальних даних та заповнити таблицю (див. табл. 4.1.).

2. Обробити отримані дані та заповнити бланк реєстрації (див. табл.4.2).

3. Побудувати гістограму розподілу (див. рис. 4.2). Визначити для заданого виробу нижню $(T_н)$ та верхню $(T_в)$ границі допуску. Із використанням даних рис. 4.3 прокоментувати гістограму.

4. Визначити середнє квадратичне відхилення та оцінити точність технологічного процесу із використанням коефіцієнта точності $K_т$ (див. рис. 4.4).

5. Заповнити таблиці 4.3 та 4.4. Побудувати криву нормального розподілу (рис. 4.5).

6. Визначити частку виробів, що відхиляються від технічних вимог.

Зміст звіту

1. Основні положення теорії статистичного контролю технологічних процесів термічної обробки.

2. Заповнені табл. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, стовбчасті діаграми, крива нормального розподілу.

3. Значення $K_т$, частка дефектної продукції, висновки щодо точності технологічного процесу.

4. Рекомендації щодо корегування параметрів технологічного процесу з метою підвищення його точності.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗАДАНОГО ВИРОБУ

Мета роботи: закріпити навички у виборі матеріалів, технології термічної обробки для різноманітних виробів на підставі вимог до них та умов експлуатації.

Загальні відомості

Вибір матеріалу. Обґрунтований вибір матеріалу забезпечує надійність виробів в умовах експлуатації і в багатьох випадках дозволяє знизити матеріалоємність деталей, вузлів, підвищити економічні показники конструкцій та машин. Для вірного вибору матеріалу слід мати інформацію щодо умов роботи виробу та конструкції вузла, до складу якого він входить [1-6]. Ця інформація дозволить врахувати:

- напружено-деформований стан, розподіл та епюри напружень по поверхні та перетину виробу;
- характер навантаження (статичне, динамічне, знакозмінне, контактне, циклічне знакопостійне і т. ін.);
- тривалість експлуатації (ресурс) або число циклів навантажень;
- температуру роботи виробів (нормальна, висока, змінна, мінусова і т. ін.);
- робоче середовище (повітря, масляний туман, розчини кислот або лугів, продукти горіння палива, водяна пара, вакуум, атмосферні осадки і т. п.);
- тип тертя та характер зношення (ковзання, кочення, окисне, окисно-абразивне, ерозійне, абразивне, кавітаційне та ін.);
- основні причини виходу аналогічних виробів із ладу, а також конструкційні, технологічні, експлуатаційні заходи по підвищенню надійності та довговічності виробів.

На підставі аналізу умов роботи виробу розробляють вимоги до хімічного складу, властивостей, структури матеріалу, котрі забезпечать технологічність, ремонтопридатність та експлуатаційні надійність і довговічність виробу. При виборі матеріалу в різних послідовностях розглядають його характеристики: механічні та функціональні

властивості; хімічний склад і його вплив на різні показники, в тому числі й економічні; технологічні властивості; структуру, її стабільність та можливість зміни в процесі експлуатації [11-13].

Механічні та інші властивості матеріалів. Безумовно вибраний матеріал (метал, сплав, композиційний або неметалевий матеріал тощо) повинен забезпечити необхідну для виробу конструкційну міцність – комплекс властивостей, котрі знаходяться в тісній кореляції зі службовими властивостями матеріалу даного виробу із врахуванням форми, розмірів, концентраторів напружень, стану поверхні виробів, характеру навантаження, фізичної та хімічної дії робочого середовища.

Якщо вироби мають нескладну форму, працюють в умовах статичного навантаження (розтяг, згин, стиснення) при нормальній температурі, то для вибору матеріалу достатньо наступних даних: границі плинності ($\sigma_{0,2}$ або $\sigma_т$), твердості (є кореляція між $\sigma_{0,2}$ та НВ), границі пружності ($\sigma_{0,05}$), модулів пружності при розтягуванні Е та в умовах чистого зсуву G. Зазначені характеристики дозволять визначити жорсткість та міцність виробу із використанням відповідних коефіцієнтів запасу міцності.

В тих випадках, коли вироби експлуатуються в складному напружено-деформованому стані, зазнають дії ударних, циклічних навантажень, різних за величиною температур, тоді при виборі матеріалу враховують критичний коефіцієнт інтенсивності напружень KIC, ударну в'язкість (KCU, KCV, KCT), температурний поріг холодноламкості Tпх та температуру напівкрихкості T50, роботу зародження (KCз) та розповсюдження (KCр) тріщини, жароміцність (границя тривалої міцності та границя повзучості), термостійкість, контактну витривалість, зносостійкість (в тому числі і опір втраті маси від корозії), границю витривалості та ін. Із наведеного стає зрозумілим, що в цьому випадку значно ускладнюється задача вибору матеріалу. Крім того, необхідно враховувати, що бажання використати високоміцний матеріал і зменшити матеріалоємність виробу нерідко супроводжується зниженням його надійності.

Необхідно зазначити, що вибраний матеріал під впливом термічної обробки може змінити свій хімічний, фазовий склад, структуру, комплекс властивостей, котрі спрямовані на забезпечення конструкційної міцності. Тому в процесі вибору матеріалу аналізують вплив різних видів термічної обробки на його властивості.

Вплив хімічного складу матеріалів на їх характеристики. Хімічний склад матеріалу визначає його будову, структурний стан, можливі варіанти та режими термічної обробки, технологію отримання матеріалів та виробів, рівень властивостей матеріалів.

В тих випадках, коли вибір стосується різноманітних сплавів, слід керуватися принципом раціонального (достатнього) легування. Використання сплавів, легованих дорогими, дефіцитними елементами, суттєво знижує економічну ефективність від їх застосування, а в деяких випадках таке застосування взагалі стає недоцільним.

При виборі матеріалу на альтернативній основі вплив хімічного складу оцінюється за зміною властивостей після однотипної термічної обробки. Так, наприклад, при виборі матеріалу для складно навантаженого виробу із групи поліпшувальних сталей розглядають, наприклад, сталі марок 40, 40Х, 40ХН, 40ХН2, 40ХН2М після гарту та відпуску при однаковій температурі, наприклад, 550 чи 600°С.

Коли до матеріалу виробу висувають спеціальні вимоги щодо фрикційних, антифрикційних властивостей, корозійної стійкості, жаростійкості, жароміцності, ударної в'язкості, зносостійкості, холодностійкості, питомої міцності і т. ін., то розглядають спеціальні сталі, сплави на основі нікелю, алюмінію, міді, титану, магнію, композиційні матеріали, неметалеві матеріали, тобто матеріали із особливими функціональними властивостями.

У сучасному матеріалознавстві отримує розвиток такий напрямок як розробка та використання сплавів із метастабільною аустенітною структурою, схильною до деформаційних фазових перетворень в процесі експлуатації. На основі принципу підвищення енергоємності процесів зношення та руйнування розроблені безнікелеві високоміцні сталі аустенітно-мартенситного, аустенітного, мартенсито-аустенітного класів (08Х18Г6СФ, 08Х22Г6СФ, 17Х16Г12Д2СТЛ та ін.), а також використовують технології термічної обробки відомих, класичних сталей, які дозволяють отримати після гартування велику кількість метастабільного аустеніту (наприклад, після гартування сталі Х12М від 1150°С в структурі фіксується до 75…90 % залишкового аустеніту).

Технологічні властивості матеріалів в багатьох випадках відіграють значну роль у вирішенні питання раціонального вибору матеріалу для виробу. Для виготовлення деталей методами холодного видавлювання, висаджування, обкочування матеріал повинен мати добру пластичність, форму частинок зміцнювальних фаз – близьку до сфе-

ричної. Для деталей, що виготовляють глибоким витягуванням при 20°С, використовують переважно однофазні або двофазні сплави із невеликою кількістю другої фази, в тому числі і зміцнювальної (α-латуні, дуралюміни, α-сплави на основі титану, маловуглецеві сталі із вмістом не більше 0,15% С).

У випадку, якщо заготовки виробів отримують гарячими куванням (в тому числі і ротаційним), штампуванням, пресуванням, видавлюванням, осадженням, важливою характеристикою є пластичність при високих температурах. Наявність при температурі деформування значної кількості карбідів, нітридів, погіршує технологічну пластичність, а перевищення температур плавлення евтектик призведе до утворення в штамповках тріщин, надривів.

Задовільну оброблюваність різанням мають сплави із твердістю 170…280 НВ. Більш низька твердість, наприклад, сплавів із кольорових металів, приводить до суттєвого зростання шорсткості поверхні виробів, налипання матеріалу виробу на різальний інструмент. Сплави на основі нікелю в термічно обробленому стані мають задовільну твердість 260…300 НВ у поєднанні із низькою оброблюваністю різанням (коефіцієнти оброблюваності різанням дорівнюють: $K_{Vтв\ спл} = 0,20$; $K_{Vшв\ ст} = 0,08$). Для порівняння: зазначені вище коефіцієнти для сталі 45 (як еталона) із твердістю 175 НВ дорівнюють одиниці. Підвищення в'язкості, міцності, опору зсуву, схильності до наклепу, зниження теплопровідності середньо- та високолегованих сталей – причина їх низької оброблюваності різанням. Для значної групи виробів важливими є показники здатності до шліфування та полірування (вимірювальні, штампові та різальні інструменти, вальниці, зубчасті колеса, оболонки, оздоблювальні вироби, вироби домашнього вжитку і т. ін.). Наявність у складі сталей ванадію, титану, ніобію, алюмінію приводить до утворення високотвердих крихких карбідів, карбонітридів, нітридів, котрі знижують ці характеристики та погіршують стан поверхні виробів.

До матеріалів для складних конструкцій (оболонки, корпуси, камери згорання, опори) висувають особливі вимоги щодо зварюваності. Низький вміст вуглецю та легувальних елементів, малі об'ємні зміни, обумовлені фазовими та структурними перетвореннями при охолодженні – складові, що підвищують зварюваність сплавів.

В довідковій літературі для більшості металів та сплавів надається інформація щодо їх технологічних властивостей.

Вибір технології. На експлуатаційні характеристики виробів впливає не тільки вибір матеріалу, а і технологія виготовлення, до якої входить термічна обробка. В деяких випадках без термічної обробки неможливе виготовлення виробів (наприклад, вироби із керамічних, порошкових, композиційних матеріалів) або інші технологічні операції (обробки) з метою енергозбереження поєднують із термічною обробкою (як, наприклад, пружини підвіски легкових автомобілів, ресорні листи; виконують одноразове нагрівання із наступними гарячою пластичною деформацією та гартом). При будь-якому варіанті технологія термічної обробки повинна забезпечити заданий рівень властивостей матеріалу виробу при мінімальних витратах технологічних речовин, часу, енергоносіїв, трудових ресурсів і т. ін., що врешті решт впливає на собівартість термічної обробки.

Задача вибору технологічного процесу термічної обробки вирішується поетапно:

1. Вибір режиму(ів) термічної обробки на підставі матеріалу та вимог до виробу, типових режимів обробки аналогічних матеріалів та виробів.

2. Визначення параметрів основних операцій термічної обробки (температур, швидкостей нагрівання та охолодження, тривалості на різних технологічних операціях та переходах, склад та витрати робочих середовищ).

3. Вибір додаткових технологічних операцій (рихтування, промивання, поверхневе пластичне деформування (ППД), вилучення окалини).

4. Визначення параметрів додаткових технологічних операцій термічної обробки (зусилля рихтування, час перебування під навантаженням, склад та температура мийного розчину, характеристики робочих тіл для ППД та параметри їх взаємодії із виробами, умови заневолення пружних елементів і т.ін.).

5. Вибір основного і додаткового обладнання, інструментів і приладів для контролю якості термічної обробки, розробка технологічних пристосувань.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Отримати від викладача завдання і підготувати вихідні дані для його виконання.

2. Ознайомитися із умовами експлуатації заданого виробу, роботою вузла та механізму, до складу яких входить виріб, вимогами до матеріалу виробу.

3. Підготувати дані для заповнення карти технологічного процесу термічної обробки (температури, витримки, склад робочих середовищ і т.ін.).

Контрольні питання

1. Вплив умов експлуатації виробів на вибір матеріалу для їх виготовлення.
2. Залежність конструкційної міцності від хімічного складу матеріалу, його структури.
3. Класифікація конструкційних матеріалів за призначенням, хімічним складом та її використання при науковому виборі матеріалу.
4. Класифікація інструментальних матеріалів за призначенням, хімічним складом та їх використанням при науковому виборі матеріалу.
5. Чим пояснити розширення використання керамічних інструментальних матеріалів? Наведіть приклади таких матеріалів та виробів із них.
6. Чим пояснити розширення використання композиційних, порошкових матеріалів, полімерів, пластмас, металізованих пластмас ? Наведіть приклади таких матеріалів та виробів із них.
7. Чим можна пояснити використання при виборі матеріалів таких їх характеристик, як K_{IC}; T_{50}; КСТ; $T_{пх}$?
8. Який зв'язок між технологічністю виробу та цеховою собівартістю термічної обробки?
9. Для наведених викладачем виробів та матеріалів приведіть та охарактеризуйте основні технологічні властивості та чинники, що на них впливають.
10. Основні чинники, що впливають на параметри термічної (хіміко-термічної) обробки.
11. На підставі чого конструктором виробу призначається (призначаються) матеріал(и)-замінники для виготовлення виробу ?
12. Послідовність робіт по створенню нових виробів, їх модернізації з метою підвищення довговічності.

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Стисло описати умови роботи заданого виробу та вузла, в якому він знаходиться, охарактеризувати вимоги до механічних, технологічних, експлуатаційних властивостей.

2. Вибрати групу(и) матеріалів і на альтернативній основі (не менше трьох матеріалів) на підставі співставлення складу, властивостей, вартості, надійності здійснити вибір одного матеріалу.

3. Всебічно охарактеризувати вибраний матеріал, роль його компонентів, описати схему технології отримання матеріалу та виробу, зміни в хімічному складі, структурі та властивостях в процесі експлуатації.

4. Розглянути декілька варіантів термічної обробки вибраного матеріалу і на підставі порівняння отримуваних властивостей та технічних вимог до матеріалу запропонувати режим термічної обробки виробу.

5. Розробити технологію термічної обробки, навести графік та карту технологічного процесу, описати сутність кожної операції та структуру і властивості матеріалу.

Зміст звіту

1. Загальні положення щодо наукового вибору матеріалів та технологій термічної обробки на основі вимог до матеріалів та умов експлуатації.

2. Характеристика виробу, особливості його конструкції, схеми маршрутної технології виготовлення, вузла, до якого входить виріб, та умови експлуатації.

3. Порядок обґрунтованого вибору матеріалу із посиланням на властивості, структуру. Вартість заготовки виробу, що виготовлений із різних матеріалів.

4. Послідовне викладання відповіді на питання обґрунтування вибору режиму термічної обробки, описання змін структури та властивостей на усіх переходах та операціях. Графік та карта технологічного процесу термічної обробки.

5. Висновки по роботі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6
СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА ЇХ СТАТИСТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ

Мета роботи: освоїти методи аналізу стабільності процесів термічної обробки та їх регулювання із застосуванням статистичного аналізу.

Загальні відомості

Як зазначалось раніше (див. лабораторну роботу №4), статистичний контроль та регулювання якості продукції в термічному виробництві – це невід'ємна складова в задачі організації високоефективного виробництва. В даній роботі розглядається сутність основних складових статистичних методів управління якістю продукції (див.рис.4.1). Статистичний аналіз стабільності технологічного процесу дозволяє за допомогою статистичних методів визначити його закономірності протікання в часі, повторюваність та відтворюваність його результатів. Статистичне регулювання технологічного процесу термічної обробки – це корегування параметрів технологічного процесу за результатами вибіркового контролю виробів з метою технологічного забезпечення необхідного рівня якості продукції та попередження виникнення браку. Аналіз стабільності технологічних процесів і їх регулювання тісно між собою пов'язані [9, 10].

Статистичне регулювання технологічних процесів (СРТП) зручно здійснювати за допомогою контрольних карт, що засновані на статистиці, отриманій за результатами вибіркового контролю. До таких статистик відносять: $\overline{X}$ – середнє арифметичне; $\widetilde{X}$ – медіана; σ – середнє квадратичне відхилення; R – розмах; P – частка дефектних одиниць продукції і т.ін. На контрольній карті позначають границі регулювання, що обмежують область допустимих значень статистики.

Вихід точки за границю регулювання (або поява її на самій границі) – це сигнал про розлад технологічного процесу. Контрольна карта дозволяє не лише виявити розлад процесу, але й допомагає з'ясувати його причину. Звісно, що контрольна карта – це документ, який може бути використаний для прийняття обґрунтованих рішень по поліпшенню якості продукції.

На підставі аналізу результатів контрольної карти може бути прийнято рішення про перегляд допуску на контрольований параметр, про зміну або модернізацію обладнання, зміну параметрів технологічного процесу. Використовують наступні види контрольних карт:

– середніх арифметичних значень ($\overline{X}$ *–карта*);
– медіан ($\widetilde{X}$ *–карта*);
– середніх квадратичних значень (σ*–карта*);
– розмахів (*R–карта*);
– числа дефектних одиниць продукції (*np–карта*);
– частки дефектних одиниць продукції (*P–карта*);
– числа дефектів (*C–карта*);
– числа дефектів на одиницю продукції (*U–карта*).

Перші чотири види контрольних карт використовують при контролі за кількісною оцінкою, останні чотири – при контролі за альтернативною системою. При виборі виду контрольної карти слід дотримуватись наступних рекомендацій:

- контрольну карту $\overline{X}$ –R (середніх арифметичних значень та розмаху) використовують при вимірюванні регульованих показників, наприклад, границі міцності, твердості, глибини шару, ударної в'язкості, відносного видовження тощо. Використовують при серійному та масовому виробництві, коли коефіцієнт точності технологічного процесу $K_m = 6\sigma/T$ знаходиться у межах 0,75...0,85; для процесів із високими вимогами до точності та при випуску продукції для авіаційної техніки, автомобілебудування, коли необхідно забезпечити безпеку споживача;

- контрольну карту $\widetilde{X}$ *–R* використовують для менш точних, ніж карта $\overline{X}$ *–R*, процесів;

- контрольну карту *P* (для частки дефектних виробів) використовують для контролю та регулювання технологічного процесу термічної обробки (після перевірки невеликої кількості виробів та розподілу їх на якісні та дефектні). Частка визначається діленням числа дефектних виробів на число перевірених виробів;

- контрольну карту *np* використовують у тому випадку, коли контрольованим параметром є число дефектних виробів за умови, що об'єм вибірки $n = const$. Тому ця контрольна карта є подібною до контрольної карти *P* (варіант $n = const$).

Статистичні методи регулювання технологічних процесів при контролі за кількісною оцінкою. Про розлад технологічного процесу судять як по середньому значенню контрольованого параметра, так і по розсіюванню значень відносно цього середнього значення. Переміщення середнього значення (в будь-яку сторону) відносно середини поля допуску та збільшення розсіювання призводять до збільшення частки дефектної продукції.

При статистичному регулюванні технологічних процесів (СРТП) використовують середнє арифметичне $\overline{X}$, або медіану $\widetilde{X}$; перевагу віддають $\overline{X}$, тому що воно є більш точною оцінкою математичного очікування ρ. На основі вибору будують $\overline{X}$–карту або $\widetilde{X}$–карту.

При СРТП використовують наступні характеристики розсіювання: середнє квадратичне відхилення σ, або розмах R_i і будують σ–карту або R–карту. Перевагу віддають σ як більш точній оцінці, ніж R.

Контроль СРТП за кількісною ознакою проводять за допомогою подвійної контрольної карти: $\overline{X}$–σ; $\overline{X}$–R; $\widetilde{X}$–σ; $\widetilde{X}$–R. Для побудови будь-якої контрольної карти перш за все необхідно попередньо визначити границі регулювання:

– для $\overline{X}$– та $\widetilde{X}$–карт – верхню $ГР_в$ та нижню $ГР_н$ границі регулювання;

– для σ– та R–карт – одну границю регулювання – $ГР_в$ (що обмежує допустиме розсіювання).

Границі регулювання визначають за допомогою параметрів нормального розподілення μ та σ. Для цього на підставі попереднього дослідження стану технологічного процесу вирішують наступні задачі:

– отримують оцінки параметрів нормального розподілу μ та σ;

– визначають імовірну частоту дефектної продукції P;

– визначають коефіцієнт точності $K_m = \dfrac{6\sigma}{T}$, де $T = T_в - T_н$.

Для попереднього дослідження стабільності технологічного процесу на контроль відбирають, як мінімум, $N = 100$ одиниць продукції, що оброблена на налагодженому обладнанні. Доцільно відбирати одиниці продукції не підряд, а, наприклад, п'яту, десяту п'ятнадцяту і т.п., що дозволяє охопити більший інтервал роботи обладнання і

більш вірно оцінити стан технологічного процесу в часі, тобто його стабільність.

У відібраних одиниць продукції контролюють заданий параметр *X*. Якщо таких параметрів декілька, то відбирають найбільш важливі із них і процедуру дослідження проводять окремо по кожному із цих параметрів (наприклад, твердості, ударній в'язкості, пластичності і т.ін.).

Результати контролю заносять у форму, позначають їх серіями по *n* одиниць (де *n* – об'єм вибірки, передбачений для статистичного регулювання досліджуваного технологічного процесу). Об'єм вибірки – від 3 до 10 одиниць продукції. Значення *X* контрольованого параметра – необхідна вхідна інформація. Загальний об'єм цієї інформації $N = n \cdot K$, де *K* – кількість вибірок.

За результатами контролю кожної вибірки розраховують статистичні характеристики $\overline{X}$, $\tilde{X}$, *S*, *R* та заносять їх у таблицю. На підставі цієї інформації визначають оцінки параметрів μ та σ.

Параметр μ (середнє значення контрольованого параметра) отримують як середнє арифметичне *K* значень $\overline{X}_i$:

$$\mu = \overline{\overline{X}} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\overline{X}_i \text{, де } \overline{X}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}\left(i = 1,2,...,K;\ j = 1,2,...,n\right).$$

Для оцінки σ (середнього квадратичного відхилення контрольованого параметра) використовують рівняння:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\overline{S}}{n}} \cdot C_2,$$

де $\overline{S} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}S_i,\ S_i = \sum\left(x_i - \bar{x}\right)^2$ *або* $S_i = \sum x_i^2 - \frac{\left(\sum x_i\right)^2}{n}$;

C_2 – поправочний коефіцієнт (табл.6.1).

Таблиця 6.1 – Значення поправочного коефіцієнта C_2

Об'єм вибірки, *n*	3	4	5	6	7	8	9	10
Коефіцієнт C_2	0,89	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97

Для оцінки σ можна використати залежність $\sigma = \frac{\overline{R}}{d_2}$, де: $\overline{R} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} R_i$; d_2 – поправочний коефіцієнт (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Значення коефіцієнта d_2

Об'єм вибірки, n	3	4	5	6	7	8	9	10
Коефіцієнт d_2	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08

Імовірна частка дефектної продукції P розраховується за формулою:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{T_в - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{T_н - \mu}{\sigma}\right),$$

де $T_в$, $T_н$ – верхня та нижня границі поля допуску (значення вказані в завданні);

$\Phi(X)$ – функції нормального розподілу (додаток А).

З останнього рівняння видно, що частка дефектної продукції тим більше, чим більше σ та чим більше буде відхилення μ від μ_0 (середнього значення контрольованого параметра при налагодженому стані технологічного процесу).

Точність технологічного процесу термічної обробки визначається як властивість технологічного процесу, що обумовлює близькість дійсних та номінальних значень параметрів термічно обробленої продукції. Вона оцінюється коефіцієнтом точності $K_т = \frac{6\sigma}{T}$, де $T = T_в - T_н$. Чим менше значення $K_т$, тим більший запас точності і тим вище гарантія бездефектного виготовлення продукції впродовж визначеного часу.

Після попереднього дослідження стану технологічного процесу вибирають контрольні карти, за допомогою яких буде здійснено статистичне регулювання. В табл. 6.3 наведено формули для визначення границь регулювання.

Після вибору контрольної карти, наприклад, $\overline{X}$–R, $\widetilde{X}$–S чи іншої, на ній відмічають значення, отримані за результатами вибіркового контролю. Так, наприклад, на $\overline{X}$– карті відмічають середні арифметичні значення, отримані за результатами вибіркового контролю, тобто $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_j$ (рис. 6.1).

На R–карті (рис. 6.1) наносять розмахи, котрі визначають за рівнянням $R = x_{max} - x_{min}$ як різницю між максимальним та мінімальним значенням контрольованого параметра у вибірці.

Таблиця 6.3 – Рівняння для визначення границь регулювання

Назва контрольної карти	Границя регулювання	Умови використання
Карта середніх арифметичних значень ($\overline{X}$-карта)	$ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_1 \cdot \sigma$	Якщо σ відома
	$ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_1 \cdot S$ $ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_2 \cdot C_2 \cdot \overline{S}$ $ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_3 \cdot \overline{R}/d_2$	Якщо σ невідома
Карта медіан ($\widetilde{X}$-карта)	$ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_4 \cdot \sigma$	Якщо σ відома
	$ГР_{в,н} = \mu_0 \pm A_4 \cdot \widetilde{R}$	Якщо σ невідома
Карта середньоквадратичних значень (*S-карта*)	$ГР_в = B \cdot \overline{S}$	
Карта розмахів (*R-карта*)	$ГР_в = D \cdot \overline{R}$	

Примітка. Коефіцієнти A_1, A_2, A_3, A_4, B, D – в табл. 6.4, C_2 – в табл. 6.1; $\widetilde{X}$ – медіана K розмахів R_i; d_2 – табл. 6.2.

Приклад: Прийнято рішення перевести на статистичне регулювання технологічний процес рекристалізаційного відпалення листової сталі 12Х18Н10Т в печі типа ТРО. За показник якості вибрано параметр – відносне видовження δ = 40%, його відхилення $\delta_в$ = +5%; $\delta_н$ = -3%.

Таблиця 6.4 – Значення коефіцієнтів для визначення границь регулювання

Коефіцієнт	Значення коефіцієнтів в залежності від об'єму вибірки *n*							
	3	4	5	6	7	8	9	10
A_1	1,73	1,5	1,34	1,23	1,13	1,06	1,00	0,95
A_2	1,49	1,29	1,15	1,05	0,97	0,91	0,86	0,81
A_3	1,96	1,63	1,43	1,29	1,18	1,1	1,03	0,98
A_4	1,68	1,4	1,23	1,11	1,02	0,94	0,89	0,84
B	2,57	2,37	2,09	1,96	1,89	1,82	1,77	1,71
D	2,57	2,28	2,11	2,00	1,92	1,86	1,82	1,78

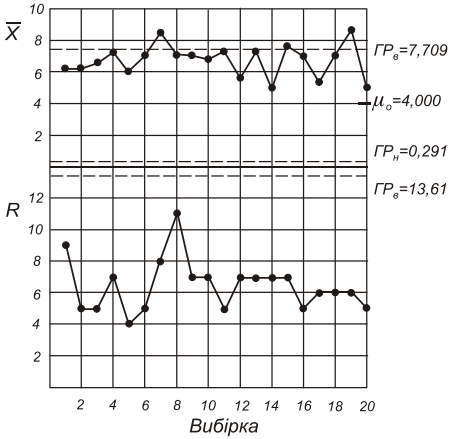


Рисунок 6.1 – Контрольна $\overline{X}$ –R–карта

Впровадження СРТП здійснюється в три етапи.

1[ий] етап. Попереднє дослідження стабільності технологічного процесу. На цьому етапі визначають імовірну частку дефектної продукції $P = 1 - q$ та коефіцієнт точності $K_m = 6\sigma/T$.

2[ий] етап. Побудова (заповнення) контрольної карти та вибір плану контролю.

3[ий] етап. Статистичне регулювання технологічного процесу.

На 1-ому етапі необхідно мати вхідну інформацію, яку отримаємо після випробування серій із 5 зразків (всього 20 серій), котрі відби-

рались через 1 годину від термічно оброблених листів. Для спрощення розрахунків приймаємо за базу δ = 35%, результати випробувань (відхилення від δ = 35%) запишемо в табл. 6.5.

$$\mu = \overline{\overline{X}} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K=20}\overline{X}_i = \frac{1}{20}\begin{pmatrix} 6,2+6,2+6,6+6,4+6,0+6,8+8,4+7,2+ \\ +7,0+6,6+7,6+5,8+7,6+5,2+7,8+6,8+ \\ +5,4+7,0+8,4+5,6 \end{pmatrix} = \frac{134,6}{20} = 6,73\%,$$

$$\overline{R} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K=20} R_i\,,\ \sigma = \frac{\overline{R}}{d_2},.$$

По табл. 6.2 при $n = 5$ $d_2 = 2,33$.

$$\overline{R} = \frac{1}{20}\cdot 129 = 6,45\,,$$

$$\sigma = \frac{6,45}{2,33} \approx 2,768\,.$$

Значення μ та σ дозволяють визначити частку дефектної продукції P на даній операції:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{T_в - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{T_н - \mu}{\sigma}\right),$$

де $T_в$ та $T_н$ – верхня та нижня границі поля допуску.

За механічними вимогами ($\delta_в = 40 + 5 = 45\%$; $\delta_н = 40 - 3 = 37\%$).

Раніше для спрощення розрахунків прийнято за базу δ = 35%, тому із отриманих значень віднімемо 35%, отримаємо $T_в = \delta_в - \delta = 45 - 35 = 10\%$; $\delta_н - \delta = T_н = 37 - 35 = 2\%$.

Визначимо частку P дефектної продукції:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{10 - 6,73}{2,768}\right) + \Phi\left(\frac{2 - 6,73}{2,768}\right) = 1 - \Phi(1,181) + \Phi(-1,709)\,.$$

Таблиця 6.5 – Результати попереднього дослідження стану технологічного процесу

Підприємство – металургійний завод		Статистична обробка результатів аналізу технологічного процесу (контроль за кількісною ознакою)							
Цех холодної прокатки		Обладнання – агрегат ТРО		Контрольована операція – рекристалізаційний відпал				Контрольований параметр $\delta = 40^{+5}_{-3}\%$	
Об'єм контролю N=100		Об'єм вибірки n=5		Засіб контролю – УВМ-1000				Точність контролю 1,0%	
Дата	Час	№ вибірки	Результати контролю					$\overline{X}_i$	R_i
01.09	7^{00}	1	1	5	8	7	10	6,2	9
	8^{00}	2	6	4	4	8	9	6,2	5
	9^{00}	3	5	8	7	9	4	6,6	5
	10^{00}	4	11	3	8	8	7	6,4	7
	11^{00}	5	7	8	5	6	4	6,0	4
	12^{00}	6	8	4	9	5	8	6,8	5
	13^{00}	7	4	12	10	6	10	8,4	8
	14^{00}	8	7	9	12	1	7	7,2	11
	15^{00}	9	4	7	6	7	11	7,0	7
	16^{00}	10	5	10	6	9	3	6,6	7
02.09	7^{00}	11	8	5	6	9	10	7,6	5
	8^{00}	12	3	8	7	2	9	5,8	7
	9^{00}	13	4	7	11	9	7	7,6	7
	10^{00}	14	2	6	4	9	5	5,2	7
	11^{00}	15	10	11	8	6	4	7,8	7
	12^{00}	16	4	6	9	7	8	6,8	5
	13^{00}	17	5	9	6	4	3	5,4	6
	14^{00}	18	10	6	7	4	8	7,0	6
	15^{00}	19	8	12	7	9	6	8,4	6
	16^{00}	20	4	5	9	4	5	5,6	5
								134,6	129

Примітка. $\overline{X}_i$ – середньоарифметичне значення контрольованого параметру у вибірці; R_i – різниця між максимальним та мінімальним значенням контрольованого параметру у вибірці.

Значення Ф(Х) знаходимо за додатком А:

$$Ф(1{,}181) = 0{,}8810; \qquad Ф(-1{,}709) = 0{,}0436,$$
$$P = 1 - 0{,}8810 + 0{,}0436 = 0{,}1626.$$

Таким чином, імовірна частка дефектної продукції складає 16,26%.

Оцінимо даний технологічний процес із використанням коефіцієнта точності:

$$K_m = \frac{6\sigma}{T_в - T_н} = \frac{6 \times 2{,}768}{10 - 2} = \frac{16{,}608}{8} = 2{,}076.$$

Оскільки $Km = 2{,}076$ значно більше нормального значення $K_m \le 0{,}98$, то даний технологічний процес по точності та стабільності признається незадовільним, близько 16,3% із термообробленого прокату – дефектна продукція.

У зв'язку із тим, що технологічний процес признано незадовільним, необхідно його поліпшити, а потім знову визначити K_m.

2[ий] етап – побудова контрольної карти та вибір плану контролю. Використовуємо $\overline{X}$–R–карти. Визначимо границі регулювання для $\overline{X}$–карти по табл. 6.3. Оскільки оцінку σ ми отримуємо на підставі розмаху, то:

$$ГР_в = \mu_0 + A_3 \cdot \left(\overline{R} / d_2\right)$$
$$ГР_н = \mu_0 - A_3 \cdot \left(\overline{R} / d_2\right)$$

де μ_0 – середина допуску $\mu_0 = \frac{T_в - T_н}{2} = \frac{45 - 37}{2} = 4\%$;

A_3 = 1,43 при вибірці n = 5 (див. табл. 6.4).

$ГР_в = 4 + 1{,}43 \cdot (6{,}45/2{,}33) = 7{,}709\%$

$ГР_н = 4 - 1{,}43 \cdot (6{,}45/2{,}33) = 0{,}291\%$

Визначимо границю регулювання для *R*–карти $ГР_в = D \cdot \overline{R}$. Значення коефіцієнта *D* вибираємо по табл. 6.4. При вибірці $n = 5$, $D = 2{,}11$ $ГР_в = 2{,}11 \cdot 6{,}45 = 13{,}61\%$.

Після визначення границь регулювання, будуємо контрольну карту (рис. 6.1), для цього обираємо масштаб та наносимо точки за даними табл. 6.5.

3[ий] етап. Після побудови контрольної карти приступаємо до статистичного регулювання даного технологічного процесу. Для цього слід звернути увагу на те, що $\overline{X}$ значення розташовані біля верхньої границі регулювання симетрично по відношенню до μ_o, що безумовно приводить до того, що біля 16% термообробленої сталі є дефектною продукцією. Це можна пояснити підвищеною температурою рекристалізаційного відпалу та крупним зерном аустеніту. Для зміни такого становища понижуємо температуру обробки, підвищуємо швидкість руху листів в печі, зменшуємо час їх перебування в печі. Вносимо корективи в технологію, переконуємося в тому, що оброблювана продукція годна. Для цього через кожну годину відбираємо на контроль $n = 5$ зразків, випробуємо їх, визначаємо $\overline{X}$ та *R*, помічаємо точки на $\overline{X}$ –*R*–карті. Якщо точки не виходять за границі регулювання, процес продовжується, якщо виходять – здійснюємо налагоджування параметрів (регулювальний вплив).

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

1. Описати сутність статистичних методів контролю стабільності технологічних процесів термічної обробки та їх регулювання.

2. Підготувати табл. 6.5 та рис. 6.1 для внесення даних індивідуального завдання.

3. Привести методику статистичної оцінки стабільності технологічного процесу та корегування їх параметрів.

Контрольні питання

1. Сутність та задачі статистичного аналізу стабільності технологічних процесів та їх статистичне регулювання.

2. Охарактеризувати особливості статистичного регулювання технологічних процесів за допомогою контрольних карт.

3. Які контрольні карти використовують при контролі процесів за кількісною оцінкою ?

4. Як визначають μ, μ_o, σ, R, $T_в$, $T_н$, частку дефектної продукції ?

5. Як впливає кількість зразків у вибірці на середнє квадратичне відхилення σ?

6. Викласти методику побудови контрольної $\overline{X}$ –R–карти, її використання для статистичного регулювання технологічного процесу термічної обробки.

7. Чим пояснити, що середні значення твердості в окремих партіях вибірки знаходяться вище (нижче) границі регулювання ?

8. Для заданих викладачем X–карти, R–карти здійснити аналіз та запропонувати способи регулювання (корегування) для підвищення точності та стабільності технологічного процесу.

9. Чи може бути процес точним та нестабільним, точним та стабільним, стабільним, але не точним? Наведіть приклади і надайте до них пояснення.

Порядок виконання роботи

1. Отримати варіант завдання із вибіркою експериментальних даних, заповнити табл. 6.5.

2. Результати дослідження стану технологічного процесу, середнє значення $\overline{X}_i$ та розмах R_i занести в табл. 6.5.

3. Із використанням статистичних методів визначити частку дефектної продукції та коефіцієнт точності технологічного процесу.

4. Визначити верхню та нижню границю регулювання ($ГР_в$, $ГР_н$.) параметра, верхню границю розмаху, побудувати та проаналізувати контрольну $\overline{X} - R$ –карту.

Зміст звіту

1. Основні поняття теорії статистичного аналізу стабільності технологічного процесу та його регулювання.

2. Заповнена табл. 6.5, розрахунки для визначення необхідних величин, $\overline{X}$ –R–карта.

3. Висновки щодо стабільності технологічного процесу, його точності та статистичного регулювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: підручник для вищих навч. закл. Київ: Ліра-К; Олди-плюс, 2013. 612 с.

2. Мережко Н. В., Зіміна Н. К., Сіренко С. О., Сім'ячко О. І. Матеріалознавство і технологія матеріалів: підручник для вищих навч. закл. Київ: Київський національний торговельно-економічний університет, 2010. 352 с.

3. Наука про матеріали: досягнення та перспективи: монографія у 2 т. Київ: Академперіодика, 2018. 395 с.

4. Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю., Самохін С. М. Інженерне матеріалознавство: підручник. Миколаїв: НУК, 2009. 444 с.

5. Клименко С. А. та ін. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту: монографія. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2009. 172 с.

6. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

7. Дипломное проектирование термических цехов / под ред. К. Ф. Стародубова. Киев: Вища школа, 1974. 157 с.

8. Долженков И. Е., Стародубов К. Ф., Спасов А. А. Основы проектирования термических цехов. Киев: Вища школа, 1986. 214 с.

9. Райцес В. Б., Литвин В. М. Химико-термическая обработка деталей. Киев: Техника, 1980. 152 с.

10. Соколов К. Н. Оборудование термических цехов. Киев, Донецк: Вища школа, 1984. 328 с.

11. Сігова В. І., Юскаєв В. Б., Будник А. Ф. Технологія і проектне рішення термічних цехів і дільниць: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДУ, 2010. 318 с.

12. Шохорі А. В., Чумак М. Г. Термічна обробка металів: навч. посіб. Київ: Либідь, 2002. 511 с.

13. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 212 с.

ДОДАТОК А

ІНТЕГРАЛЬНА ФУНКЦІЯ НОРМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ

Таблиця А.1 – Розподіл в в інтервалі (-∞, -z)

-zF(z)	-z F(z)	-z F(z)	-z F(z)	-z F(z)	-z F(z)	-*z* F(z)
1	2	3	4	5	6	7
	3.00.0013	2.50.0062	2.00.0227	1.50.0668	1.00.1587	0.50.3085
3.90.0000	2.94.0014	2.49.0064	1.99.0233	1.49.0681	0.99.1611	0.49.3121
3.80.0001	2.98.0014	2.48.0066	1.98.0238	1.48.0694	0.98.1635	0.48.3156
	2.97.0015	2.47.0068	1.97.0244	1.47.0708	0.97.1660	0.47.3197
3.70.0001	2.96.0015	246.0069	1.96.0250	1.46.0721	0.96.1685	0.46.3728
	2.95.0016	2.45.0071	1.95.0256	1.45.0735	0.95.1711	0.45.3264
3.60.0002	2.94.0016	2.44.0073	1.94.0262	1.44.0749	0.94.1736	0.44.3300
	2.93.0017	2.43.0075	1.93.0268	1.43.0764	0.93.1762	0.43.3336
3.50.0002	2.92.0017	2.42.0078	1.92.0274	1.42.0778	0.92.1788	0.42.3372
	2.91.0018	2.41.0080	1.91.0281	1.41.0793	0.91.1814	0.41.3409
3.40.0003	2.90.0019	2.40.0082	1.90.0287	1.40.0808	0.90.1841	0.40.3446
3.39.0003	2.89.0019	2.39.0084	1.89.0294	1.39.0823	0.89.1876	0.39.3483
3.38.0004	2.88.0020	2.38.0087	1.88.0300	1.38.0838	0.88.1894	0.38.3520
3.37.0004	2.87.0020	2.37.0089	1.87.0307	1.37.0853	0.87.1921	0.37.3557
3.36.0004	2.86.0021	2.36.0091	1.86.0314	1.36.0869	0.86.1949	0.36.3594
3.35.0004	2.85.0022	2.35.0094	1.85.0322	1.35.0885	0.85.1977	0.35.3632
3.34.0004	2.84.0023	2.34.0096	1.84.0329	1.34.0901	0.84.2004	0.34.3669
3.33.0004	2.83.0023	2.33.0099	1.83.0336	1.33.0918	0.83.2033	0.33.3707
3.32.0004	2.82.0024	2.32.0102	1.82.0344	1.32.0934	0.82.2061	0.32.3745
3.31.0006	2.81.0025	2.31.0104	1.81.0351	1.31.0951	0.81.2090	0.31.3783
3.30.0005	2.80.0026	2.30.0107	1.80.0359	1.30.0968	0.80.2119	0.30.3821
3.29.0005	2.79.0026	2.29.0110	1.79.0367	1.29.0985	0.79.2148	0.29.3859
3.28.0005	2.78.0027	2.28.0113	1.78.03/5	1.28.1003	0.78.2177	0.28.3897
3.27.0005	2.77.0028	2.27.0116	1.77.0384	1.27.1020	0.77.2206	0.27.3936
3.26.0006	2.76.0029	2.26.0119	1.76.0392	1.26.1038	0.76.2236	0.26.3974
3.25.0006	2.75.0030	2.25.0122	1.75.0401	1.25.1056	0.75.2266	0.25.4013
3.24.0006	2.74.0031	2.24.0125	1.74.0409	1.24.1075	0.74.2296	0.24.4052
3.23.0006	2.73.0032	2.23.0129	1.73.0418	1.23.1093	0.73.2327	0.23.4090
3.22.0006	2.72.0033	2.22.0132	1.72.0427	1.22.1112	0.72.2358	0.22.4129
3.21.0007	2.71.0034	2.21.0135	1.71.0436	1.21.1131	0.71.2388	0.21.4168

Кінець таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7
3.20.0007	2.70.0035	2.20.0139	1.70.0445	1.20.1151	0.70.2420	0.20.4207
3.19.0007	2.69.0036	2.19.0143	1.69.0455	1.19.1170	0.69.2451	0.19.4246
3.18.0007	2.68.0037	2.18.0146	1.68.0465	1.18.1190	0.68.2482	0.18.4286
3.17.0008	2.67.0038	2.17.0150	1.67.0475	1.17.1210	0.67.2514	0.17.4325
3.16.0008	2.66.0039	2.16.0154	1.66.0485	1.16.1230	0.66.2546	0.16.4364
3.15.0008	2.65.0040	2.15.0158	1.65.0495	1.15.1251	0.65.2578	0.15.4404
3.14.0008	2.64.0041	2.14.0162	1.64.0505	1.14.1271	0.64.2611	0.14.4246
3.13.0009	2.63.0043	2.13.0166	1.63.0515	1.13.1292	0.63.2643	0.13.4286
3.12.0009	2.62.0044	2.12.0170	1.62.0526	1.12.1314	0.62.2676	0.12.4325
3.11.0009	2.61.0045	2.11.0174	1.61.0537	1.11.1355	0.61.2709	0.11.4364
3.10.0010	2.60.0047	2.10.0179	1.60.0558	1.10.1357	0.60.2742	0.10.4602
3.09.0010	2.59.0048	2.09.0183	1.59.0559	1.09.1379	0.59.2776	0.09.4641
3.08.0010	2.58.0049	2.08.0188	1.58.0570	1.08.1401	0.58.2810	0.08.4681
3.07.0011	2.57.0051	2.07.0192	1.57.0582	1.07.1423	0.57.28t3	0.07.4721
3.06.0011	2.56.0052	2.06.0197	1.56.0594	1.06.1446	0.56.2877	0.06.4761
3.05.0011	2.55.0054	2.05.0202	1.55.0606	1.05.1469	0.55.2912	0.05.4801
3.04.0012	2.54.0055	2.04.0207	1.54.0618	1.04.1492	0.54.2946	0.04.4840
3.03.0012	2.53.0057	2.03.0212	1.53.0630	1.03.1515	0.53.2981	0.03.4880
3.02.0013	2.52.0059	2.02.0217	1.52.0643	1.02.1539	0.52.3015	0.02.4920
3.01.0013	2.51.0060	2.01.0222	1.51.0655	1.01.1562	0.51.3050	0.01.4960
3.00.0013	2.50.0062	2.00.0227	1.50.0668	1.00.1587	0.50.3085	0.00.5000

Таблиця А.2 – Розподіл в в інтервалі (+∞, +z)

+zF(z)	+z F(z)	+z F(z)	+z F(z)	+z F(z)	+z F(z)	+z F(z)
1	2	3	4	5	6	7
0.00.5000	0.50.6915	1.00.8413	1.50.9332	2.00.9773	2.50.9938	3.00.9987
0.01.5040	0.51.6950	1.01.8438	1.51.9345	2.01.9778	2.51.9940	3.01.9987
0.02.5080	0.52.6985	1.02.8461	1.52.9357	2.02.9783	2.52.9941	3.02.9987
0.03.5120	0.53.7019	1.03.8485	1.53.9370	2.03.9788	2.53.9943	3.03.9988
0.04.5160	0.54.7054	1.04.8508	1.54.9382	2.04.9793	2.54.9945	3.04.9988
0.05.5199	0.55.7088	1.05.8531	1.55.9394	2.05.9798	2.55.9946	3.05.9989
0.06.5239	0.56.7123	1.06.8554	1.56.9406	2.06.9803	2.56.9948	3.06.9989
0.07.5279	0.57.7157	1.07.8577	1.57.9418	2.07.9808	2.57.9949	3.07.9989
0.08.5319	0.58.7190	1.08.8599	1.58.9430	2.08.9812	2.58.9951	3.08.9990
0.09.5359	0.59.7224	1.04.8621	1.59.9441	2.09.9817	2.59.9452	3.09.9990

Продовження таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7
0.10.5398	0.60.7258	1.10.8643	1.60.9452	2.10.9821	2.60.9953	3.10.9990
0.11.5438	0.61.7291	1.11.8665	1.61.9463	2.11.9826	2.61.9955	3.11.9991
0.12.5478	0.62.7324	1.12.8686	1.62.9474	2.12.9830	2.62.9956	3.12.9991
0.13.6517	0.63.7357	1.13.8708	1.63.9485	2.13.9834	2.63.9957	3.13.9991
0.14.5557	0.64.7389	1.14.8729	1.64.9495	2.14.9838	2.64.9959	3.14.9992
0.15.5596	0.65.7422	1.15.8749	1.65.9509	2.15.9842	2.65.9960	3.15.9992
0.16.5636	0.66.7454	1.16.8770	1.66.9515	2.16.9846	2.66.9961	3.16.9992
0.17.5675	0.67.7486	1.17.8790	1.67.9525	2.17.9850	2.67.9962	3.17.9992
0.18.5714	0.68.7518	1.18.8810	1.68.9535	2.18.9854	2.68.9963	3.18.9993
0.19.5754	0.69.7549	1.19.8830	1.69.9645	2.19.9857	2.69.9964	3.19.9943
0.20.5793	0.70.7580	1.20.8849	1.70.9554	2.20.9861	2.70.9965	3.20.9993
0.21.5832	0.71.7612	1.21.8869	1.71.9564	2.21.9865	2.71.9966	3.21.9993
0.22.5871	0.72.7642	1.22.8888	1.72.9573	2.22.9868	2.72.9967	3.22.9994
0.23.5910	0.73.7673	1.23.8907	1.73.9582	2.23.9871	2.73.9968	3.23.9994
0.24.5948	0.74.7704	1.24.8925	1.74.9591	2.24.9875	2.74.9969	3.24.9994
0.25.5987	0.75.7734	1.25.8944	1.75.9599	2.25.9878	2.75.9970	3.25.9994
0.26.6026	0.76.7764	1.26.8962	1.76.9608	2.26.9881	2.76.9971	3.26.9994
0.27.6064	0.77.7794	1.27.8980	1.77.9616	2.27.9884	2.77.9972	3.27.9995
0.28.6103	0.78.7823	1.28.8997	1.78.9625	2.28.9887	2.78.9973	3.28.9995
0.29.6141	0.79.7852	1.29.9015	1.79.9633	2.29.9890	2.79.9974	3.29.9995
0.30.6179	0.80.7881	1.30.9032	1.80.9641	2.30.9893	2.80.9974	3.30.9995
0.31.6217	0.81.7910	1.31.9049	1.81.9649	2.31.9896	2.81.9975	3.31.9995
0.32.6255	0.82.7939	1.32.9066	1.82.9656	2.32.9898	2.82.9976	3.32.9996
0.33.6293	0.83.7967	1.33.9082	1.83.9664	2.33.9901	2.83.9977	3.33.9996
0.34.6331	0.84.7996	1.34.9099	1.84.9671	2.34.9904	2.84.9977	3.34.9996
0.35.6368	0.85.8023	1.35.9115	1.85.3678	2.35.9906	2.85.9978	3.35.9996
0.36.6406	0.86.8051	1.36.9131	1.86.9686	2.36.9909	2.86.9979	3.36.9996
0.37.6443	0.87.8079	1.37.9147	1.87.9693	2.37.9911	2.87.9980	3.37.9996
0.38.6480	0.88.8106	1.38.9162	1.88.9700	2.38.9913	2.88.9980	3.38.9996
0.39.6517	0.89.8133	1.39.9177	1.89.9706	2.39.9916	2.89.9981	3.39.9997
0.40.6554	0.90.8159	1.40.9192	1.90.9713	2.40.9918	2.90.9981	3.40.9997
0.41.6591	0.91.8186	1.41.9207	1.91.9719	2.41.9920	2.91.9982	
0.42.6628	0.92.8212	1.42.9222	1.92.9726	2.42.9922	2.92.9983	3.50.9998
0.43.6664	0.93.8238	1.43.9236	1.93.9732	2.43.9925	2.93.9983	
0.44.6700	0.94.8264	1.44.9251	1.94.9738	2.44.9927	2.94.9984	3.60.9998

Кінець таблиці А.2

1	2	3	4	5	6	7
0.45.6736	0.95.8289	1.45.9265	1.95.9744	2.45.9929	2.95.9984	
0.46.6772	0.96.8315	1.46.9279	1.96.9750	2.46.9931	2.96.9985	3.70.9999
0.47.6808	0.97.8340	1.47.9292	1.97.9756	2.47.9932	2.97.9985	
0.48.6844	0.98.8365	1.48.9306	1.98.9762	2.48.9934	2.98.9986	3.80.9999
0.49.6879	0.99.8389	1.49.9319	1.99.9767	2.49.9936	2.99.9986	
0.50.6915	1.00.8413	1.50.9332	2.00.9773	2.50.9938	3.00.9487	3.901.0000