

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Любич О.Й., Будник А.Ф.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Рекомендовано Міністерством освіти і
науки України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів

Суми
Видавництво СумДУ
2009

ББК 34.4я2

Л93

УДК 621.002+621.76+658.512(075.8)

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1,4/18-Г-801 від 04.04.2008)*

Рецензенти:

д-р техн.наук, проф. В.Б. Тарельник
(Національний аграрний університет, м. Суми);
д-р техн.наук, проф. О.Д. Погребняк
(Інститут модифікації поверхні, м. Суми);
д-р техн.наук, проф. О.Р.Якуба
(Національний аграрний університет, м. Суми)

Любич О.Й., Будник А.Ф.

Л93 Експериментальне забезпечення наукових досліджень:
Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009.
-186 с.

ISBN 978-966-657-239-7

Посібник містить відомості про методи і засоби вимірювання лінійних величин, температур, механічних властивостей. Описано різні способи оцінки вимірювань та методологію експерименту і теоретичних досліджень в матеріалознавстві. Викладено механізми планування та проведення експерименту з необхідною точністю, прийняття рішень при виборі параметрів оптимізації, факторів, плану експериментів та інтерпретації одержаних результатів.

Для студентів-матеріалознавців III-IV рівнів акредитації, що вивчають дисципліну «Основи наукових досліджень і організація експерименту», при виконанні курсових, комплексних проектів та кваліфікаційних робіт, а також самостійних робіт з дисциплін навчального плану спеціальності напряму 0901. Може бути корисним науковим співробітникам та аспірантам.

ББК 34.4я2

ISBN978-966-657-239-7

© О.Й.Любич, А.Ф.Будник 2009

© Вид-во СумДУ, 2009

ЗМІСТ

Передмова	5
1 Планування експерименту і його завдання	7
2 Методи досліджень	16
2.1 Методологія теоретичних досліджень	16
2.2 Методологія експерименту	22
2.3 Розроблення плану-програми експерименту	25
2.4 Статистичні методи оцінки вимірювань	30
2.5 Інтервальна оцінка за допомогою довірчої вірогідності	36
2.6 Встановлення мінімальної кількості вимірів	39
2.7 Проведення експерименту	42
2.8 Методи графічного зображення результатів вимірів	47
3 Методи і засоби вимірювання	51
3.1 Вимірювання і вимірювальні величини	51
3.2 Вимірювання лінійних розмірів	54
3.2.1 Шкальні засоби вимірювання	54
3.2.2 Пневматичні вимірювальні прилади	55
3.2.3 Індуктивні прилади	57
3.2.4 Механотрони	60
3.2.5 Оптико-механічні і оптичні прилади	60
3.2.6 Акустичні прилади	65
3.3 Вимірювання температури	68
3.3.1 Механічні термометри	68
3.3.2 Електричні контактні термометри	70
3.3.3 Безконтактні методи вимірювання температури	75
3.3.4 Кольорові індикатори температури	80
3.4 Механічні випробування	84
3.4.1 Статичні випробування	84
3.4.2 Випробування ударним навантаженням	86
3.4.3 Випробування циклічним навантаженням	88
3.4.4 Вимірювання твердості	91

3.4.5	Випробування на зносостійкість	93
3.4.6	Неруйнуючі методи визначення механічних властивостей і структури	97
3.4.7	Методи визначення залишкових напруг	105
4	Математичний метод планування експерименту	114
4.1	Основні визначення	114
4.2	Параметр оптимізації	115
4.3	Фактори	117
4.4	Вибір моделі досліджуваного процесу	119
4.5	Вибір експериментальної області фактора простору	123
4.6	Вибір основного рівня	124
4.7	Вибір інтервалів варіювання	125
4.8	Повний експеримент фактора типу 2К	127
4.8.1	Властивості повного факторного експерименту	130
4.8.2	Математична модель повного факторного експерименту	131
4.9	Дробовий факторний експеримент	137
4.10	Обробка результатів експерименту	141
4.10.1	Реалізація плану експерименту	141
4.10.2	Помилка паралельних дослідів і перевірка однорідності дисперсій	143
4.10.3	Перевірка значущості коефіцієнтів	144
4.10.4	Круте сходження по поверхні відклику	147
4.11	Приклади розв'язання задач оптимізації	151
4.11.1	Приклад	157
4.11.2	Приклад	164
4.11.3	Приклад	170
	Питання тестового контролю	176
	Список літератури	181

...О, сколько нам открытий чудных
Готовит просвещения дух,
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг...

А.С. Пушкин

ПЕРЕДМОВА

Планування експерименту і математична обробка його результатів все більше входять до кола питань, необхідних студентам-матеріалознавцям при виконанні курсових робіт, проектів і випускних кваліфікаційних робіт бакалавра, фахівця і магістра за фахом 090101 «Прикладне матеріалознавство». Засвоєння і використання методів планування експерименту дозволяють підвищити його ефективність і значущість.

Оскільки основою експерименту є вимірювання, то у цьому посібнику наведено відомості про методи і засоби вимірювання лінійних величин, температури і механічних властивостей. Описані різні методи оцінки вимірювань, а також методології експерименту і теоретичних досліджень у матеріалознавстві.

Дана робота допоможе вивчити і здійснити на практиці проведення планування експерименту при пошуку оптимальних рішень; встановити фактори, що найсильніше впливають на експеримент; провести експерименти з достатньо високою точністю; скласти матрицю планування експериментів, а також провести аналіз одержаних результатів.

Описаний у посібнику метод планування експерименту Бокса-Уїлсона є одним з найпростіших. Успішність його застосування залежить від рішення багатьох питань, пов'язаних з ухваленням неформалізованих рішень при виборі параметрів оптимізації, факторів, плану експериментів та при інтерпретації одержаних результатів.

Оволодіння теорією планування експерименту дасть досліднику точну логічну схему і спосіб розв'язання матеріалознавчих задач на різних етапах дослідження.

1 ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ЙОГО ЗАВДАННЯ

Важливим фактором в підвищенні продуктивності праці інженерів і науковців є автоматизація досліджень, що включає широке коло завдань - від моделювання творчого процесу, організації колективів і планування наукових досліджень на основі застосування комп'ютерних методів до створення автоматизованих наукових приладів, засобів і систем автоматизації експериментів. Проте всі ці завдання нерозв'язні без проведення експериментів.

Експеримент займає одне з головних місць серед способів отримання інформації про внутрішні взаємозв'язки явищ у природі і техніці. Він є відправною точкою і критерієм більшості наших знань. Експериментальні пошуки часто ведуться у таких галузях (сферах), де теоретично не можна зробити яких-небудь передбачень. За допомогою експериментальних даних, отриманих безпосередньо від об'єктів, що вивчаються, перевіряється істинність теоретичних передумов. Щоб уявити собі масштаби повсякденної експериментальної роботи, достатньо, разом з натурними дослідженнями, що проводяться у різних сферах науки при проектуванні нової техніки, врахувати також випробування зразків досвідченої і серійної продукції на тисячах заводів.

У міру зростання складності досліджуваних процесів і явищ зростають витрати на апаратуру і проведення експерименту. При цьому постійно зростає складність вирішуваних завдань, а великий обсяг інформації, необхідної для з'ясування внутрішніх взаємозв'язків, примушує застосовувати все більш складні комплекси для обробки інформації [1].

Все частіше виявляються недоступними безпосередньому вимірюванню характеристики об'єктів випробувань, що підлягають визначенню в результаті експерименту. Внаслідок цього сукупність техніко-економічних показників, за якими проводиться оцінка випробовуваного об'єкта

або ухвалюються важливі організаційні й інженерні рішення, не збігається, як правило, із сукупністю параметрів об'єкта, визначуваних за наслідками натурального експерименту. Важливим завданням є організація випробувань об'єктів, процеси функціонування яких мають складний динамічний характер і схильні до істотних впливів умов зовнішнього середовища, що змінюються. У ході випробувань збирається велика кількість експериментальних даних, що вимагають обробки і аналізу. Розроблення технічного об'єкта (або технологічного процесу) здебільшого передбачає такі етапи: лабораторну установку - дослідну установку – промислову експериментальну установку, хоча установки, побудовані в лабораторних умовах, багато у чому допускають екстраполяцію на промислові установки. При цьому тривалість аналізу і осмислення результатів випробувань та їх обліку для коректування характеристик нових виробів дуже значна. Цей процес добре ілюструється у вітчизняній і зарубіжній практиці співвідношенням: година випробувань — тисяча годин обробки.

Широке застосування експериментальних методів привело до створення теорії експерименту. Ця теорія дає експериментатору відповіді на такі питання:

1) як потрібно організувати експеримент, щоб найкращим чином вирішити поставлене завдання (у значенні витрат часу і засобів або точності результатів);

2) як слід обробляти результати експерименту, щоб одержати максимальну кількість інформації про досліджуваний об'єкт (або явище);

3) які обґрунтовані висновки можна зробити про досліджуваний об'єкт за наслідками експерименту.

Основою теорії експерименту є математична статистика, яка застосовна для аналізу експерименту у тих випадках, коли його результати можуть розглядатися як випадкові величини або випадкові процеси. Ця умова виконується

ся у більшості досліджень, оскільки, як правило, результати експерименту пов'язані з деякою невизначеністю. Серед багатьох причин такої невизначеності можна назвати випадковий характер досліджуваних процесів, вплив неконтрольованих факторів, неконтрольовані зміни умов експерименту і помилки спостережень. Сюди можна також віднести вимірювальні помилки, причини яких криються у недосконалості приладів, методів вимірювань і пристроїв передачі даних. Вплив цих факторів на результат спостережень може у багатьох випадках розглядатися як випадковий.

Під впливом статистики змінилися методи аналізу, оцінки і представлення результатів спостережень. Під впливом математичної статистики стала змінюватися і сама стратегія експерименту. Тепер стало можливим говорити про виникнення математичної теорії експерименту або, точніше, про теорію експериментальних досліджень, що базується на математичній статистиці. З'явився новий розділ математичної статистики - планування експерименту.

Математична теорія експерименту, сформульована на мові математичної статистики, стає метатеорією, оскільки в ній формулюються такі загальні для всіх експериментаторів принципи, як ухвалення рішень в умовах невизначеності, обробка результатів спостережень, планування експерименту.

У варіанті схеми класифікації експериментів можуть бути прийняті такі узагальнені ознаки: структура; стадія наукових досліджень, до якої належить експеримент; організація; поставлення завдання; спосіб проведення [1].

За структурою експерименти поділяють на натурні, модельні і модельно-комп'ютерні (машинні). У натурному експерименті засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо з об'єктом дослідження, у модельному - експериментують не з самим об'єктом, а з його за-

мінником - моделлю. Модель тут виконує двояку роль. По-перше, вона є безпосередньо об'єктом експериментального дослідження. По-друге, стосовно об'єкта, що вивчається, модель виступає як засіб експериментального дослідження. Модельно-комп'ютерний експеримент є різновидом модельного експерименту, при якому відповідні характеристики об'єкта, що вивчається, обчислюються за допомогою комп'ютера. Даний вид експерименту відрізняється універсальністю і має широку сферу (галузь) застосування.

За стадією наукових досліджень експерименти поділяють на лабораторні, стендові і промислові. До лабораторних належать експерименти з вивчення загальних закономірностей різних явищ і процесів, з перевірки наукових гіпотез і теорій. Стендові випробування (дослідження) проводять за необхідності вивчити цілком конкретний процес, що проходить у досліджуваному об'єкті з певними фізичними, хімічними й іншими властивостями. За наслідками стендових випробувань роблять висновок про різні недоробки при розрахунках або конструюванні об'єкта (виробу, технологічного процесу та ін.), а також виробляють рекомендації щодо серійного випуску виробу (матеріалу) і умов його експлуатації. Промисловий експеримент проводять при створенні нового виробу або процесу за даними лабораторних або стендових випробувань, при оптимізації діючого процесу, при проведенні контрольно-вибіркових випробувань якості продукції, що випускається (матеріалу).

З погляду організації експериментів можна виділити звичні (рутинні), спеціальні (технічні), унікальні і змішані експерименти. Звичні експерименти проводяться у лабораторних умовах, як правило, за нескладними методиками з використанням порівняно простого експериментального устаткування і зв'язані з одноманітними вимірюваннями і обчисленнями, що багато разів повторюються протягом

тривалого проміжку часу. Спеціальні експерименти пов'язані із створенням і дослідженням різних матеріалів, приладів і апаратів. Унікальні експерименти проводяться на складному експериментальному устаткуванні (типу ядерного реактора, радіоелектронного мікрокомплексу, синхрофазотрона). Такі експерименти відрізняються великими обсягами експериментальних даних, високою швидкістю проходження досліджуваних процесів, широким діапазоном вимірювання характеристик об'єктів дослідження. Змішані експерименти містять сукупність різнотипних експериментів, об'єднаних єдиною програмою дослідження і пов'язаних один з одним результатами досліджень.

Поставлення завдання конкретного експериментального дослідження визначається рівнем складності досліджуваного об'єкта, ступенем його вивчення і необхідним ступенем деталізації його опису. Ці загальні принципи постановлення завдань розглядаються як складові елементи ознаки класифікації. За цією ознакою експерименти щодо знаходження моделі об'єкта дослідження поділяють на класи [1]:

1) що враховують наявність неоднорідностей різного вигляду (наприклад, неоднорідність складу матеріалів, сировини, відмінності в часі проведення окремих дослідів, у діях лаборантів і т. д.);

2) розраховані на виявлення механізму явищ (істотним у поставленнях завдань експериментів даного класу є дослідження добре організованих об'єктів і достатньо високий рівень апріорної інформації — побудова моделей механізму явищ для погано організованих об'єктів або при недостатності апріорної інформації навіть для добре організованих об'єктів скрутна або неможлива);

3) простори його параметрів, які враховують локальну область, що відповідає екстремуму деякого критерію оп-

тимальності за наявності тимчасового дрейфу (зміни) параметрів;

4) простори його параметрів, які враховують локальну область, що відповідає екстремуму деякого критерію оптимальності за відсутності тимчасового дрейфу параметрів;

5) впливи вхідних змінних, що враховують ступінь, на вихідні змінні;

6) що дозволяють перетворити набір змінних об'єкта дослідження;

7) розраховані на прогнозування його поведінки та ін.

За способом проведення розрізняють пасивні, активні, активні з програмним керуванням, активні із зворотним зв'язком і активно-пасивні експерименти.

Пасивний експеримент базується на реєстрації вхідних і вихідних параметрів, що характеризують об'єкт дослідження без втручання в експеримент у процесі його проведення, із застосуванням математико-статистичних методів тільки після закінчення експерименту для обробки зібраних експериментальних даних. Дослідження впливу сукупності факторів на результати експерименту виробляється за умови, що змінюється тільки один з факторів і фіксуються значення всіх інших. У складних системах, в яких велике число дій не може контролюватися або керуватися, ця умова не виконується.

На відміну від пасивного некерованого активний експеримент припускає можливість активної дії на досліджуваній об'єкт. При використанні методів активного експерименту математичний опис будується у вигляді сукупності статичних і динамічних вихідних характеристик об'єкта, які реєструються при подачі на його входи спеціальних збуджуючих дій. При активному експерименті можна оцінити дисперсію помилки, строго перевірити адекватність моделі і вжити заходів для виконання умов, необхідних

для застосування методу множинного регресійного аналізу, використововуваного для обробки результатів експерименту.

Активний експеримент з програмним керуванням проводиться за заздалегідь складеним планом. Відповідно до цього плану експериментатор впливає на вхідні параметри досліджуваного об'єкта, а вихідні параметри, відображаючи реакцію досліджуваного об'єкта на керуючі дії, дозволяють з'ясувати природу процесів, що відбуваються, в об'єкті дослідження.

У разі активного експерименту із зворотним зв'язком, інтерпретуючи результати на кожному кроці експерименту, можна вибрати оптимальну стратегію управління експериментом. Такі експерименти можна проводити автоматично (без участі експериментатора).

Активно-пасивний експеримент характеризується тим, що при його проведенні одна частина даних просто реєструється, а інша, крім того, обробляється у процесі експерименту і бере участь у виробленні керуючих дій. У такому експерименті одна частина інформації, отримуваної від об'єкта, відповідає характеристикам, що змінюються відповідно до прикладених керуючих дій, а інша відображає характеристики, не схильні до керуючих дій.

Концепція вибору умов проведення експериментів має основоположне значення в теорії планування експерименту. Галузь (сфера) застосування методів планування експерименту дуже широка. Ці методи виявляються дуже ефективними при проведенні матеріалознавчих досліджень в лабораторних умовах, в експериментах на дослідних, напівпромислових і промислових установках.

Метою будь-якого експерименту є оцінка якості технічної системи. При цьому розрізняють її статичні і динамічні характеристики, тобто показники якості самої системи як об'єкта виробництва, а також процесу її функціонуван-

ня, що характеризує ступінь пристосованості системи для вирішення поставленого перед нею завдання, для досягнення мети операцій, реалізованої цією системою. Якість процесу функціонування системи прийнято називати ефективністю. Таким чином, ефективність системи - це ефективність процесу функціонування системи.

Кожен досліджуваний об'єкт має сукупність (множину) властивостей, що визначають якість об'єкта стосовно його призначення. При цьому властивості об'єкта, не пов'язані з його призначенням, вважаються такими, що не впливають на його якість. Кожну з властивостей об'єкта можна описати кількісно за допомогою деякої змінної, значення якої і характеризує його якість щодо цієї властивості. Цю змінну називають показником якості об'єкта, тобто у загальному випадку показник якості об'єкта - це вектор, компонентами якого є показники його властивостей.

Показники якості об'єкта поділяють на два класи: функціональні та економічні. Функціональні показники характеризують властивості об'єкта, корисні у значенні його прямого призначення, його функцій. Економічні показники характеризують, з одного боку, витрати, необхідні для надання об'єкту необхідних якостей, а з іншого - економічний ефект від його застосування.

Відповідно до ГОСТ 15467 показники якості об'єкта поділяють на одиничні, комплексні і визначальні. Одиничний показник якості відносять до однієї з його властивостей. Одиничними показниками якості є, наприклад, похибка вимірювального приладу, швидкодія якого-небудь автомата або комп'ютера, чутливість приймального пристрою і т.д. Комплексний показник якості продукції відносять до декількох властивостей продукції (або об'єкта), що визначає таку сукупність її властивостей, за якою ухвалено рішення оцінювати якість продукції. Визначальний показник якості продукції може бути одиничним і узагальненим.

Таким чином, комплексний і узагальнений показники якості визначають складні властивості продукції і є функціями від її одиничних показників. Комплексними є, наприклад, показники технічної досконалості, середньостатистичні витрати, комплексні витрати, ефект від експлуатації технічної системи, ефективність та ін.

Оскільки за визначенням якість об'єкта характеризується сукупністю його властивостей, то воно, у свою чергу, також є узагальненою властивістю об'єкта, яка сама по собі ще не характеризує ступеня його відповідності призначенню. Для цього служать показники якості і критерії його оцінки. Таким чином, слід розрізняти поняття «якість» (властивість) і «показник якості» (числова характеристика), а також поняття «показник якості» і «критерій оцінки якості» (сукупність умов).

Якість складного об'єкта оцінюють за наслідками його випробувань. Для забезпечення необхідної достовірності і об'єктивності отримуваних оцінок експеримент повинен проводитися в умовах, максимально наближених до тих, в яких об'єкт функціонуватиме, при цьому критерій оцінки його якості повинен містити такі вимоги до об'єкта, задоволення яких забезпечить виконання поставленого перед ними завдання.

У зв'язку з цим постає завдання оптимального планування експерименту в значенні вибору його найкращої схеми, тобто плану, що забезпечує за інших рівних умов найбільшу надійність оцінок якісних характеристик досліджуваного об'єкта. Теорія планування експерименту дає досліднику точну логічну схему і спосіб вирішення подібних завдань на різних етапах дослідження.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методологія теоретичних досліджень

Теоретичні дослідження повинні бути творчими, їх метою є отримання нової цінної інформації.

Спростувати існуючі або створити нові наукові гіпотези, глибоко пояснити процеси або явища, які раніше були незрозумілими або мало вивченими, зв'язати воедино різні явища, тобто знайти стрижень процесу, що вивчається, науково узагальнити велику кількість досвідчених даних - все це неможливо без теоретичного творчого мислення.

Творчий процес удосконалює відоме рішення. Вдосконалення є процесом переконструювання об'єкта мислення в оптимальному напрямі. Коли переробка досягає меж, визначених раніше поставленою за мету, створюється продукт розумової праці, наприклад, гіпотеза дослідження, тобто наукове передбачення. Процес вдосконалення приводить до своєрідного, оригінального рішення. Оригінальність виявляється в самостійній, неповторній точці зору на процес або явище.

Теоретичне дослідження має декілька стадій: вибір проблеми, знайомство з відомими рішеннями, відмова від відомих шляхів вирішення аналогічних завдань, перебір різних варіантів рішення, рішення. Творче рішення часто не укладається в задалегідь намічений план. Іноді оригінальні рішення з'являються «раптово», після, здавалося б, тривалих і безплідних спроб. Часто вдалі рішення виникають у фахівців суміжних галузей, на яких не тисне вантаж відомих рішень. Творчий процес являє собою по суті розрив звичних уявлень і погляд на явища з іншої точки зору.

Власні творчі думки, оригінальні рішення виникають тим частіше, чим більше сил, праці, часу витрачається на

постійне обдумування об'єкта дослідження, чим глибше науковець захоплений дослідною роботою. Успішне виконання теоретичних досліджень залежить не тільки від кругозору, наполегливості і цілеспрямованості науковця, але й від того, якою мірою він володіє методами і способами наукового дослідження, і в першу чергу - діалектичним методом.

Важливе місце при виконанні теоретичних досліджень займають способи дедукції та індукції. **Дедуктивний** - це такий спосіб дослідження, при якому окремі положення виводяться із загальних. Так, на основі загальних законів механіки одержують рівняння руху автомобіля. Цей спосіб визначає кінцевий результат дослідження, що базується на певних відомих логічних зв'язках, за межами яких він не може бути використаний. Недоліком дедуктивного способу дослідження є обмеження, що випливають із загальних закономірностей, на основі яких досліджується окремий випадок. Щоб всебічно досліджувати рух автомобіля, недостатньо знати лише закони механіки. Необхідно застосувати й інші принципи, виходячи з аналізу системи: «водій - автомобіль - зовнішнє середовище».

Індуктивний - це такий спосіб дослідження, при якому за окремими фактами і явищами встановлюються загальні принципи і закони. Даний спосіб широко застосовують у теоретичних дослідженнях. Так, Д.І. Менделєєв, використовуючи окремі факти про хімічні елементи, сформулював періодичний закон. Проте при теоретичних дослідженнях використовують як індукцію, так і дедукцію. Науковець, обгрунтувавши гіпотезу наукового дослідження, встановлює її відповідність загальним законам діалектики і природознавства (дедукція). У той самий час гіпотезу формулюють на основі окремих фактів (індукція). Осо-

бливу роль у теоретичних дослідженнях виконують способи аналізу і синтезу.

Аналіз - це спосіб наукового дослідження, при якому явища поділяються на складові частини. **Синтез** - протилежний спосіб, що полягає у дослідженні явища в цілому, на основі об'єднання пов'язаних один з одним елементів в єдине ціле [2]. Так, виділяючи мінерали при дослідженні цементу, застосовують метод аналізу; вивчаючи цемент як систему, що складається з мінералів, використовують метод синтезу. Спосіб синтезу дозволяє узагальнювати поняття, закони, теорії.

Методи аналізу і синтезу взаємозв'язані, їх однаково використовують в наукових дослідженнях. При аналізі явищ і процесів виникає потреба розглянути велику кількість чинників (ознак). Важливо вміти виділити головне. У цьому випадку може бути застосований спосіб **ранжирування**, за допомогою якого виключають все другорядне, не впливаючи істотно на досліджуване явище. Цей метод допускає посилення основних і ослаблення другорядних факторів, дозволяє вивчати головні особливості процесів і явищ в рівних умовах. Наприклад, при вивченні прогинань балок беруть постійними перетини, відстані між опорами, характер навантаження, температуру балки і т.д.

У наукових дослідженнях широко застосовується спосіб **абстрагування**, тобто відвернення від другорядних факторів з метою зосередитися на найважливіших особливостях явища, що вивчається. Наприклад, при дослідженні роботи якого-небудь механізму аналізують розрахункову схему, яка відображає основні, істотні властивості механізму.

У ряді випадків використовують спосіб **формалізації**. Суть його полягає у тому, що основні положення процесів і явищ подають у вигляді формул і спеціальної символіки.

Застосування символів та інших знакових систем дозволяє встановити закономірності між фактами, що вивчаються.

У теоретичних дослідженнях можливі два методи: **логічний та історичний**. Логічний метод включає гіпотетичний і аксіоматичний.

Гіпотетичний метод базується на розробленні гіпотези, наукового припущення, що містить елементи новизни і оригінальності. Гіпотеза повинна повніше і краще пояснювати явища і процеси, підтверджуватися експериментально і відповідати загальним законам діалектики і природознавства. Цей метод дослідження є основним, найпоширенішим у прикладних науках [2].

Гіпотеза складає суть, методологічну основу, теоретичне передбачення, стрижень теоретичних досліджень. Будучи керівною ідеєю всього дослідження, вона визначає напрям і обсяг теоретичних розробок.

Сформулювати найчіткіше і повно робочу гіпотезу, як правило, складно. Від того, яка сформульована гіпотеза, визначається ступінь її наближення до остаточного теоретичного рішення теми, тобто трудомісткість і тривалість теоретичних розробок. Успіх залежить від повноти зібраної інформації, глибини її творчого аналізу, чіткості, цілеспрямованості і методичних висновків за наслідками аналізу, чітко сформульованих цілей і завдань дослідження, досвіду й ерудиції науковця [2].

На стадії формулювання гіпотези теоретичну частину необхідно поділити на окремі питання, що дозволить спростити їх опрацювання. Основою для опрацювання кожного питання є теоретичні дослідження, виконані різними авторами і організаціями. Науковець на основі їх глибокого опрацювання, критичного аналізу і формулювання (у разі потреби) своїх пропозицій розвиває існуючу

чі теоретичні уявлення або пропонує нове, раціональніше теоретичне рішення теми.

Аксіоматичний метод ґрунтується на очевидних положеннях (аксіомах), що приймаються без доведення. За цим методом теорія розробляється на основі дедуктивного принципу. Великого поширення він набув у теоретичних науках (математика, математична логіка та ін.).

Історичний метод дозволяє досліджувати виникнення, формування і розвиток процесів і подій в хронологічній послідовності з метою виявлення внутрішніх і зовнішніх зв'язків, закономірностей і суперечностей. Даний метод дослідження використовується переважно у суспільних і головним чином в історичних науках. У прикладних же науках він застосовується, наприклад, при вивченні розвитку і формування тих або інших галузей науки і техніки. Відповідно до теорії пізнання між логічним та історичним методами існує єдність, яка ґрунтується на тому, що будь-яке логічне пізнання повинне розглядатися в історичному аспекті [2].

У прикладних науках основним методом теоретичних досліджень є гіпотетичний. Його методологія включає таке: вивчення фізичної, хімічної та ін. суті досліджуваного явища за допомогою описаних вище способів пізнання, формулювання гіпотези і складання розрахункової схеми (моделі) та її вивчення, аналіз теоретичних досліджень і розроблення теоретичних положень.

Опис фізичної суті досліджуваного явища (або процесу) складає основу теоретичних розробок. Такий опис повинен всебічно освітлювати суть процесу і базуватися на законах фізики, хімії, механіки, фізичної хімії та ін. Для цього дослідник повинен знати класичні закони природних наук і вміти їх використовувати стосовно робочої гіпотези наукового дослідження. Процеси, що трапляються у техні-

ці, мають ряд загальних принципових положень, оскільки проходять відповідно до законів діалектики і основних законів термодинаміки (перший, другий, третій).

Здебільшого одночасно розвиваються два протилежні процеси. Наприклад, кристалізація матеріалів разом із структуроутворенням (синтезом міцності) супроводжується деструкцією, а при дії руйнуючих навантажень разом з руйнуванням відбувається зміцнення. На різних етапах одні процеси переважають над іншими. При великих механічних навантаженнях переважають процеси руйнування, при невеликих – можливе помітне зміцнення матеріалів. Для матеріалів раннього віку характерне структуроутворення, пізнього - деструкція. Крім того, процеси і явища при цьому мають властивості інерційності, спадковості, періодичності. Багато з цих процесів розвивається за принципом ланцюгових реакцій $\left(\frac{dy}{dt} = Ky^m\right)$ або за принципом теплопровідності $\left(\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 t\right)$. Разом з детермінованими у техніці дуже поширені і випадкові процеси, особливо це стосується планування, організації і управління.

Враховуючи викладене, можна ефективніше і економічно сформулювати гіпотезу наукового дослідження і намітити план його виконання.

Етап теоретичних розробок наукового дослідження вміщує такі основні розділи: аналіз фізичної суті процесів, явищ; формулювання гіпотези дослідження, розроблення фізичної моделі; проведення математичного дослідження; аналіз теоретичних рішень, формулювання висновків [2].

Може бути прийнята й інша структура теоретичної частини дослідження. Наприклад, якщо не вдається виконати математичне дослідження, то формулюють робочу гіпотезу

у словесній формі, використовуючи графіки, таблиці та ін. Проте в технічних науках необхідно прагнути до застосування математизації висунутих гіпотез та інших наукових висновків.

2.2 Методологія експерименту

Найважливішою складовою частиною наукових досліджень є експерименти.

Експериментальне дослідження - один з основних способів отримати нові наукові знання. В його основу покладено експеримент, який є науково поставленим дослідом або спостереженням явища, де точно враховуються умови, що дозволяють стежити за його ходом, керувати ним, відтворювати його кожного разу при повторенні цих умов. Від звичного, буденного, пасивного спостереження експеримент відрізняється активною дією дослідника на явище, що вивчається.

Основна мета експерименту - перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези), а також ширше і глибше вивчення теми наукового дослідження. Експеримент повинен бути проведений по можливості в найкоротший термін з мінімальною витратою матеріальних і грошових коштів при найвищій якості одержаних результатів.

Розрізняють експерименти природні і штучні. **Природні** експерименти характерні для соціальних явищ (соціальний експеримент) в умовах, наприклад, виробництва, побуту і т.п. **Штучний** експеримент широко застосовується у багатьох галузях, і в першу чергу у технічних науках. У цьому випадку вивчають явище, ізольоване до необхідного ступеня, щоб оцінити його в кількісних і якісних відносинах. Іноді виникає необхідність провести пошукові

експериментальні дослідження. Вони необхідні у тому випадку, якщо важко класифікувати всі фактори, що впливають на явище, яке вивчається, внаслідок відсутності достатніх попередніх даних. На основі попереднього експерименту будується програма досліджень у повному обсязі.

Експериментальні дослідження поділяють на лабораторні і виробничі [2].

Лабораторні досліди проводять із застосуванням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, устаткування і т.д. Ці дослідження дозволяють найбільш повно і доброякісно з необхідною повторюваністю вивчити вплив одних характеристик при варіюванні інших. Лабораторні досліди при достатньо повному науковому обґрунтуванні експерименту (математичне планування) дозволяють одержати гарну наукову інформацію з мінімальними витратами. Проте такі експерименти не завжди повністю моделюють реальний хід процесу, що вивчається, тому виникає потреба у проведенні виробничого експерименту.

Виробничі експериментальні дослідження мають на меті вивчити процес в реальних умовах з урахуванням дії різних випадкових чинників виробничого середовища.

Такі експерименти проводять на об'єктах, що будуються, заводах, експлуатованих дорогах, будівлях і спорудах. Внаслідок, як правило, громіздкості досліду потрібне особливо ретельне продумане планування експерименту. Важливу роль виконує обґрунтування мінімальної потрібної кількості вимірювань.

Одним з різновидів виробничих експериментів є збирання матеріалів в організаціях, які накопичують за стандартними формами ті або інші дані. Цінність цих матеріалів полягає у тому, що вони систематизовані впродовж ба-

гато років єдиною методикою. Такі дані добре піддаються обробці методами статистики і теорії вірогідності.

У ряді випадків виробничий експеримент ефективно проводити методом анкетування. Для процесу, що вивчається, складають ретельно продуману методику. Основні дані збирають методом досліду виробничих організацій за задалегідь складеною анкетною. Цей метод дозволяє зібрати дуже велику кількість даних спостережень або вимірювань щодо питання, яке вивчається. До результатів анкетних даних потрібно відноситися з особливою ретельністю, оскільки вони не завжди містять достатньо надійні дані. Особливу роль тут відіграє метод статистичного чищення вимірювань.

Виробничі експериментальні дослідження можуть бути замінені дослідями на спеціальних стендах: стендові випробування дозволяють виконувати дослідження без порушення технологічного виробничого ритму, що підвищує ефективність використання вживаного в експерименті обладнання, машин і приладів.

Залежно від теми наукового дослідження обсяг експериментів може бути різним. У кращому випадку для підтвердження робочої гіпотези досить лабораторного експерименту, в гіршому - доводиться проводити серію експериментальних досліджень: попередні (пошукові), лабораторні, стендові на експлуатованому об'єкті [2].

У ряді випадків на експеримент витрачається багато засобів, науковець проводить величезну кількість спостережень і вимірювань, отримує безліч діаграм, графіків, виконує невиправдано велику кількість випробувань. На обробку і аналіз такого експерименту витрачається багато часу. Іноді виявляється, що виконано багато зайвого, непотрібного. Все це можливо, коли експериментатор чітко не

обґрунтував мету і завдання експерименту. У інших випадках результати тривалого великого експерименту неповністю підтверджують робочу гіпотезу наукового дослідження. Як правило, це також властиво для експерименту, чітко не обґрунтованого метою і завданнями. Тому, перш ніж розпочати експериментальні дослідження, необхідно розробити методологію експерименту.

Методологія експерименту - це загальні принципи, структура експерименту, його поставлення і послідовність виконання експериментальних досліджень. Методологія експерименту передбачає такі основні етапи: розроблення плану-програми експерименту; оцінку вимірювань і вибір засобів для проведення експерименту; проведення експерименту; обробку і аналіз експериментальних даних, встановлення адекватності. Наведена кількість етапів справедлива для традиційного експерименту. Разом з цим широко застосовують математичну теорію експерименту, що дозволяє різко підвищити точність і зменшити обсяг експериментальних досліджень. У цьому випадку методологія експерименту включає такі етапи: розроблення плану-програми експерименту, оцінку вимірювань і вибір засобів для проведення експерименту, математичне планування експерименту з одночасним проведенням експериментального дослідження, обробкою і аналізом отриманих даних.

2.3 Розроблення плану-програми експерименту

План-програма включає найменування теми дослідження, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок, список виконавців експерименту, календарний план робіт і мету на ви-

конання експерименту. У ряді випадків включають роботи з конструювання і виготовлення приладів, апаратів, пристосувань, методичне їх обстеження, а також програми дослідчених робіт на заводах і т.п.

Основу плану-програми складає **методика експерименту**. Методика є системою прийомів або способів для послідовного, найефективнішого експериментального дослідження і містить: мету і завдання експерименту; вибір варіюючих чинників; обґрунтування засобів і потрібної кількості вимірювань; опис проведення експерименту, обґрунтування способів обробки і аналізу результатів експерименту.

Визначення мети і завдань експерименту - один з найважливіших етапів. На основі аналізу інформації, гіпотези і теоретичних розробок обґрунтовують мету і завдання експерименту. Вся наукова інформація дозволяє у тому або іншому ступені робити висновок про очікувані закономірності процесу, що вивчається, а отже, і визначити завдання експерименту. Чітко, конкретно обґрунтовані завдання - це великий внесок в їх рішення. Кількість завдань не повинна бути дуже великою (3-4 завдання), у великому дослідженні їх може бути 8-10 [2].

Вибір варіюючих факторів - це встановлення основних і другорядних характеристик, що впливають на досліджуваний процес. Спочатку аналізують розрахункові (теоретичні) схеми процесу. На основі цього класифікують всі фактори і складають з них убуваючий по важливості для даного експерименту ряд. Правильний вибір основних і другорядних факторів виконує важливу роль в ефективності експерименту, оскільки експеримент зводиться до знаходження залежностей між цими факторами. В окремих

випадках відразу складно виявити роль основних і другорядних факторів. При цьому необхідно виконати невеликий за обсягом попередній пошуковий дослід.

Основним принципом встановлення ступеня важливості характеристики є її роль у досліджуваному процесі. Для цього вивчають процес залежно від якоїсь однієї змінної при решті постійних. Такий принцип проведення експерименту виправдовує себе тільки у тих випадках, коли змінних характеристик мало (1-3). Якщо ж змінних величин багато, доцільний принцип аналізу **багаточинника**.

Обґрунтування засобів вимірювань - це вибір необхідних для спостережень і вимірювань приладів, устаткування, машин, апаратів та ін. Експериментатор повинен бути добре ознайомлений з вимірювальною апаратурою, що випускається. Щорічно видаються каталоги на засоби вимірювання, за якими можна замовити ті, що випускаються приладобудуванням, або інші засоби вимірювань. У першу чергу використовують стандартні, серійно випускаються машини і прилади, робота на яких регламентується інструкціями, державними стандартами та іншими офіційними документами [2].

В окремих випадках виникає потреба у створенні унікальних приладів, апаратів, установок, стендів, машин для розроблення теми. При цьому розроблення і конструювання приладів інших засобів повинні бути ретельно обґрунтовані теоретичними розрахунками і практичними міркуваннями про можливість виготовлення устаткування. Створюючи нові прилади, необхідно використовувати готові вузли або реконструювати існуючі прилади.

Дуже відповідальною частиною є встановлення точності вимірювань і похибок. Методи вимірювань повинні ба-

зуватися на законах спеціальної науки - метрології, що вивчає засоби і методи вимірювань.

При експериментальному дослідженні одного і того ж процесу (спостереження і вимірювання) повторні показання на приладах, як правило, не однакові. Відхилення пояснюються різними причинами - неоднорідністю властивостей тіла (метал, полімер, композит т. д.), що вивчається, недосконалістю приладів і класом їх точності, суб'єктивними особливостями експериментатора та ін. Чим більше випадкових факторів, що впливають на дослід, тим більше відхилення окремих вимірювань від середнього значення, що вимагає повторних вимірювань, отже, необхідно дати їх потрібну мінімальну кількість. Під потрібною мінімальною кількістю вимірювань розуміють таку їх кількість, яка в даному досліді забезпечує стійке середнє значення вимірюваної величини, що задовольняє заданий ступінь точності. Встановлення потрібної мінімальної кількості вимірювань має велике значення, оскільки забезпечує отримання найоб'єктивніших результатів при мінімальних витратах часу засобів.

У методиці детально проектують процес проведення експерименту. Спочатку складають послідовність (черговість) проведення операцій вимірювань і спостережень. Потім ретельно описують кожну операцію окремо з урахуванням вибраних засобів для проведення експерименту. Велику увагу надають методам контролю якості операцій, що забезпечують при мінімальній (раніше встановленій) кількості вимірювань високу надійність і задану точність. Розробляють форми журналів для запису результатів спостережень і вимірювань.

Важливим розділом методики є вибір методів обробки і аналізу експериментальних даних. Обробка даних зводиться до систематизації всіх цифр, класифікації, аналізу. Результати експериментів повинні бути зведені в легкі для читання форми запису - таблиці, графіки, формули, номограми, що дозволяють швидко зіставляти одержані результати.

Особлива увага в методиці повинна бути надана математичним методам обробки і аналізу досліджуваних даних - встановленню емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варійованими характеристиками, знаходженню критеріїв і довірчих інтервалів та ін. Далі визначають обсяг і трудомісткість експериментальних досліджень, які залежать від глибини теоретичних розробок, ступеня точності прийнятих засобів вимірювань. Чим чіткіше сформульована теоретична частина дослідження, тим менше обсяг експерименту. Можливі три випадки результатів проведення експерименту:

1 Теоретично одержана аналітична залежність, яка однозначно визначає досліджуваний процес. Наприклад, $y=3e-2x$. У цьому випадку обсяг експерименту для підтвердження даної залежності мінімальний, оскільки функція однозначно визначається експериментальними даними.

2 Теоретичним шляхом встановлений тільки характер залежності. Наприклад, $y = ae-bx$. У цьому випадку задана сім'я кривих. Експериментальним шляхом необхідно визначити a і b . При цьому обсяг експерименту зростає.

3 Теоретично не вдалося одержати яких-небудь залежностей. Розроблені тільки припущення про якісні закономірності процесу. У багатьох випадках доцільний пошуковий експеримент. Обсяг експериментальних робіт зростає.

Тут доречний метод математичного планування експерименту. На обсяг і трудомісткість істотно впливає вид експерименту. Після встановлення обсягу експериментальних робіт складають перелік необхідних засобів вимірювань, обсяг матеріалів, список виконавців, календарний план і кошторис витрат. План-програму розглядає науковий керівник, а також обговорюють у науковому колективі і затверджують в установленому порядку [2].

2.4 Статистичні методи оцінки вимірювань

Вимірювання є основною складовою частиною будь-якого експерименту. Від ретельності вимірювань і подальших обчислень залежать результати експерименту. Тому кожен експериментатор повинен знати закономірності вимірювальних процесів: уміти правильно виміряти величини, що вивчаються; оцінити похибки при вимірюваннях; правильно, з необхідною точністю обчислити значення величин та їх мінімальну кількість; визначити найкращі умови вимірювань, при яких помилки будуть найменшими, і виробити загальний аналіз результатів вимірювань.

Вимірювання - це процес знаходження якої-небудь фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів, це пізнавальний процес порівняння величини чого-небудь з відомою величиною, прийнятою за одиницю (еталон).

Теорією і практикою вимірювань займається спеціальна наука - **метрологія**.

Вимірювання бувають статичними, коли вимірювана величина не змінюється, і динамічними, коли вимірювана

величина змінюється. Крім того, вимірювання поділяються на прямі і непрямі.

При прямих вимірюваннях шукану величину встановлюють безпосередньо з досліду, при непрямих - функціонально від інших величин, визначених прямими вимірюваннями $b = f(a)$, де b знайдене за допомогою непрямих вимірювань, а - за допомогою прямих вимірювань.

Розрізняють три класи вимірювань.

Особливо точні - еталонні вимірювання з максимально можливою точністю. Цей клас рідко застосовується в експериментальних дослідженнях машинобудівного виробництва. **Високоточні** - вимірювання, похибка яких не повинна перевищувати заданих значень. Цей клас вимірювань використовують при деяких найвідповідальніших експериментах, а також для контрольно-перевірних вимірювань приладів. **Технічні** це вимірювання, в яких похибка визначається особливостями засобів вимірювання.

Розрізняють також абсолютні вимірювання і відносні. **Абсолютні** - це прямі вимірювання в одиницях вимірюваної величини, наприклад, абсолютна вологість зразка w у відсотках.

Відносні - вимірювання, представлені відношенням вимірюваної величини до однойменної величини, що приймається за порівнянню. Наприклад, відносна вологість зразка w/w_t , де w_t - абсолютна вологість зразка межі текучості. Результати вимірювань оцінюють різними показниками.

Похибка вимірювання - це алгебраїчна різниця між дійсним значенням вимірюваної величини x_q і одержаним при вимірюванні x_i . Вимірювання x_q - це таке значення вимірюваної величини, яке явно точніше, ніж одержуване при вимірюванні. З деяким допущенням x_q можна вважати істинним або точним значенням величини

$$\varepsilon = x_q - x_i.$$

Значення ε називають **абсолютною похибкою вимірювання**. **Відносна похибка** вимірювання, %:

$$\delta = \pm \frac{\varepsilon}{x_q} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Точність вимірювання - це ступінь наближення вимірювання до дійсного значення величини.

Достовірність вимірювання показує ступінь довіри до результатів вимірювання, тобто вірогідність відхилень вимірювання від дійсних значень.

Щоб підвищити точність і достовірність вимірювань, необхідно зменшити похибку. Похибки при вимірюваннях виникають внаслідок ряду причин:

- недосконаlostі методів і засобів вимірювань;
- недостатньо ретельного проведення досліду;
- впливів різних зовнішніх факторів у процесі досліду;
- суб'єктивних особливостей експериментатора та ін.

Ці причини є результатом дії багатьох факторів.

Похибки класифікують на систематичні і випадкові.

Систематичні - це такі похибки вимірювань, які при повторних експериментах залишаються постійними (або змінюються за відомим законом). Якщо чисельні значення цих похибок відомі, їх можна врахувати під час повторних вимірювань.

Випадковими називають похибки, що виникають випадково при повторному вимірюванні. Ці вимірювання не можуть бути виключені як систематичні. Проте за наявності багатократних повторів за допомогою статистичних методів можна виключити випадкові вимірювання, що відхиляються.

Різновидом випадкових похибок є **грубі похибки або промахи**, що істотно перевищують систематичні або ви-

падкові похибки. Промахи і грубі похибки спричиненні, як правило, помилками експериментатора. Їх легко знайти. У розрахунок ці похибки не беруться і при обчисленні x_q ними нехтують. Таким чином, можна записати

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - систематичні і випадкові похибки вимірювань.

У процесі експерименту важко відділити систематичні похибки від випадкових. Проте при ретельному і багатократному експерименті все ж таки можна виключити систематичні похибки (помилки). Основна задача вимірювань полягає у тому, щоб одержати по можливості результати вимірювань з меншими похибками. Нижче розглянуті основні принципи і методи усунення систематичних і випадкових помилок.

Систематичні похибки можна поділити на п'ять груп.

Перша - інструментальні похибки, що виникають внаслідок порушень засобів вимірювань додаткових люфтів або тертя, неточності градуйованої шкали, зносу і старіння вузлів і деталей засобів вимірювання і т.п.

Друга - похибки, які виникають через неправильну установку засобів вимірювань.

Третя - похибки, що виникають в результаті дії зовнішнього середовища: високих температур повітря, магнітних і електричних полів, атмосферного тиску і вологості повітря, вібрації і коливань від рухомих частин та ін.

Четверта - суб'єктивні похибки, виникають внаслідок індивідуальних фізіологічних, психофізіологічних, антропологічних властивостей людини.

П'ята - похибки методу. Вони з'являються в результаті необґрунтованого методу вимірювань (при різних спрощеннях схем або функціональних залежностей, відсутності

теоретичних обґрунтувань методу вимірювання, малій кількості повторюваностей та ін.).

Систематичні похибки можуть бути постійними або змінними, збільшуються або зменшуються у процесі експерименту. Їх обов'язково потрібно виключати. Відомі випадки, коли через наявність систематичних похибок робилися неправильні наукові висновки з експерименту. Систематичні помилки (похибки) можуть бути усунені наступними методами.

Часто від систематичних похибок всіх груп можна позбавитися до початку експерименту шляхом регулювання або ремонту засобів вимірювання, ретельної перевірки установки засобів вимірювань, усунення небажаних дій зовнішнього середовища. Особлива увага повинна бути надана обґрунтуванню теорії і методики вимірювань. Одним з ефективних методів усунення систематичних помилок 1-3 груп є виключення їх у процесі експерименту. Основним принципом цього виключення є повторне вимірювання величин.

Застосовують також метод заміщення. При вимірюванні x замість досліджуваного об'єкта встановлюють той, що еталонує, наперед заміряний з високою точністю. Різниця у вимірюваннях дозволить знайти похибку вимірювального засобу.

Якщо все ж таки не можна встановити значення систематичних похибок, то обмежуються оцінкою їх меж.

Випадкові похибки. При проведенні з однаковою ретельністю тих або інших експериментів результати вимірювань однієї і тієї ж величини (навіть з урахуванням відомого закону систематичних похибок), як правило, відрізняються між собою. Як наголошувалося вище, це свідчить

про наявність випадкових похибок. Кожен експериментатор, аналізуючи результати вимірювань, повинен уміти правильно оцінити випадкові похибки, що неминуче виникають. До випадкових помилок відносять також, як вже відомо, промахи і грубі похибки.

Найтипівішими причинами промахів є помилки при спостереженнях: неправильний відлік за шкалою вимірювальних приладів, описки (помилки) при записі результатів вимірювань, різні маніпуляції з приладами або їх окремими вузлами (перестановка, заміна блоків, перевірка та ін.). Грубі похибки виникають внаслідок несправності приладів, а також умов експерименту, що раптово змінилися.

Аналіз випадкових похибок ґрунтується на **теорії випадкових помилок**. Ця теорія дає можливість з певною гарантією обчислити дійсне значення і оцінити можливі помилки, за якими роблять висновок про дійсне значення шуканої величини.

В основу теорії випадкових помилок покладені припущення про те, що при великому числі вимірювань випадкові похибки однакової величини, але різного знака трапляються однаково часто; великі похибки трапляються рідше, ніж малі, або вірогідність появи похибки зменшується із зростанням її величини, при нескінченно великому числі вимірювань істинне значення вимірюваної величини дорівнює середньоарифметичному значенню всіх результатів вимірювань: поява того або іншого результату вимірювання як випадкової події описується нормальним законом розподілу.

Розрізняють генеральну і вибірккову сукупність вимірювань. Під генеральною сукупністю мають на увазі всю безліч можливих значень вимірювань x_i або можливих зна-

чень похибок Δx_i . Для вибіркової сукупності вимірювань n обмежено і у кожному конкретному випадку строго визначається. Звичайно вважають, що якщо $n > 30$, то середнє значення даної сукупності вимірювань \bar{x} достатньо наближається до його істинного значення.

Теорія випадкових помилок дозволяє розв'язати дві основні задачі: оцінити точність і надійність вимірювання при даній кількості вимірів; визначити мінімальну кількість вимірів, що гарантує необхідну (задану) точність і надійність вимірювання. Разом з цим виникає необхідність виключити грубі помилки ряду, визначити достовірність одержаних даних та ін. Розглянемо основні задачі.

2.5 Інтервальна оцінка за допомогою довірчої вірогідності

Для великої вибірки і нормального закону розподілу загальними оцінними характеристиками вимірювання є дисперсія σ і коефіцієнт варіації K_v [2]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad K_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}. \quad (2.3)$$

Дисперсія характеризує однорідність вимірювання. Чим вище σ , тим більше розкид вимірювань. Коефіцієнт варіації характеризує мінливість. Чим вище K_v , тим більше мінливість вимірювань щодо середніх значень. K_v оцінює також розкид при оцінці декількох вибірок.

Довірчим називається інтервал значень x_i , в який потрапляє істинне значення x_d вимірюваної величини із заданою вірогідністю. Довірчою вірогідністю (достовірністю) вимірювання називається вірогідність P_d того, що істинне

значення x_d вимірюваної величини потрапляє в даний довірчий інтервал. Ця величина визначається в частках одиниці або у відсотках. Необхідно встановити вірогідність того, що x_d потрапить в зону $a \leq x_d \leq b$, де a і b – крайні точки встановлення довірчої вірогідності. Довірча вірогідність P_d описується виразом

$$P_d = P(a < m(x) < b) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{b - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma}\right) \right], \quad (2.4)$$

де $\Phi(t)$ - функція Лапласа, аргументом якої є відношення μ до середньоквадратичного σ , тобто

$$t = \mu/\sigma, \quad (2.5)$$

$\mu = b - \bar{x}$, $\mu = -(a - \bar{x})$, t - гарантійний коефіцієнт;

$m(x)$ – істинне значення вимірюваної величини.

Функція $\Phi(t)$ - це інтегральна функція Лапласа:

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (2.6)$$

Чисельні значення $\Phi(t)$ наведені у табл. 2.1.

У цій задачі можливий інший варіант. На основі певних даних встановлена довірча вірогідність P_d . Дуже часто її беруть такою, що дорівнює 0,9011; 0,9545; 0,9973. Необхідно встановити точність вимірювань, тобто довірчий інтервал 2μ .

Оскільки $P_d = \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)$, то за табл. 2.1 зворотною ін-

терполяцією можна визначити половину довірчого інтервалу

$$\mu = \sigma \operatorname{arg} \Gamma(P_d) = \sigma t, \quad (2.7)$$

де $\operatorname{arg} \Phi(P_d)$ - аргумент функції Лапласа або при $n < 10$ - Стьюдента (табл. 2.2). Довірчий інтервал характеризує то-

чність вимірювання даної вибірки, а довірча вірогідність - достовірність вимірювання.

Таблиця 2.1 – Чисельні значення інтегральної функції Лапласа

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,0000	0,75	0,5467	1,50	0,8664
0,05	0,0399	0,80	0,5763	1,55	0,8789
0,10	0,0797	0,85	0,6047	1,60	0,8904
0,15	0,1192	0,90	0,6319	1,65	0,9011
0,20	0,1585	0,95	0,6579	1,70	0,9109
0,25	0,1974	1,00	0,6827	1,75	0,9199
0,30	0,2357	1,05	0,7063	1,80	0,9281
0,30	0,2357	1,05	0,7063	1,80	0,9281
0,35	0,2737	1,10	0,7287	1,85	0,9357
0,40	0,3108	1,15	0,7419	1,90	0,9426
0,45	0,3473	1,20	0,7699	1,95	0,9488
0,50	0,3829	1,25	0,7887	2,00	0,9545
0,55	0,4177	1,30	0,8064	2,25	0,9756
0,60	0,4515	1,35	0,8230	2,50	0,9876
0,65	0,4843	1,40	0,8385	3,00	0,9973
0,70	0,5161	1,45	0,8529	4,00	0,9999

Приклад. Виконано 30 вимірювань міцності покриття труб хімічної апаратури.

При цьому середній модуль пружності покриття $E_c = 170$ МПа. Обчислене значення середньоквадратичного відхилення виявилось $\sigma = 3,1$ МПа. Визначити точність і достовірність експерименту.

Необхідну точність вимірювань визначимо для різних рівнів довірчої вірогідності, взявши відповідно значення $\arg \Phi(t)$ за табл. 2.1: $P_d = 0,9011; 0,9545; 0,9973$;
 $\mu = \pm 3,1 \cdot 1,65 = 5,1; \pm 3,1 \cdot 2,0 = 6,2; \pm 3,1 \cdot 3 = 9,3$ МПа.

Отже, для даного засобу і методу довірчий інтервал зростає приблизно у два рази, якщо P_d збільшити тільки на 10%. Необхідно визначити достовірність вимірювань для встановленого довірчого інтервалу, наприклад, $\mu = \pm 7$ МПа. За формулою (2.5) $t = \frac{\mu}{\sigma} = 7/3,1 = 2,26$. За табл. 2.1 для $t = 2,26$ визначаємо $P_d = 0,9876$. Це означає, що в заданий довірчий інтервал із 100 вимірювань не потрапляють тільки три.

Значення $1-\Phi(t)$ називають рівнем значущості. З нього випливає, що при нормальному законі розподілу похибка, що перевищує довірчий інтервал, траплятиметься один раз з n вимірювань:

$$n_n = \frac{P_d}{1 - P_d} \quad (2.8)$$

або інакше доводиться нехтувати одним з n_n вимірювань.

Приклад. Використовуючи дані наведеного вище прикладу, обчислити кількість вимірювань, з яких одне вимірювання перевищує довірчий інтервал.

За формулою (2.8) маємо для $P_d = 0,9$; $n = 0,9/(1 - 0,9) = 9$ вимірювань. Для P_d , що дорівнює 0,95 і 0,9973, відповідно 19 і 367 вимірювань.

2.6 Встановлення мінімальної кількості вимірювань

Усі експериментальні дослідження в техніці, як вже наголошувалося, базуються на вимірюваннях. Для проведення дослідів з необхідною точністю і достовірністю необхідно знати ту кількість вимірювань, при яких експериментатор упевнений в позитивному результаті. Проте надмірно велика кількість вимірювань вимагає значних витрат часу і ресурсів. У зв'язку з цим однією з першочергових задач при статистичних методах оцінки є встановлення мі-

німального, але достатнього для даних умов числа вимірювань.

Задача зводиться до встановлення мінімального об'єму вибірки (числа вимірювань) N_{min} при заданих значеннях, довірчого інтервалу 2μ і довірчої вірогідності. При виконанні вимірювань необхідно знати їх точність Δ , яку звичайно характеризують σ_0 - середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення σ :

$$\sigma_0 = \sigma / \sqrt{n}; \Delta = \sigma_0 / \bar{x}. \quad (2.9)$$

Значення σ_0 часто називають середньою помилкою. Довірчий інтервал помилки вимірювання Δ визначається аналогічно, як і для вимірювань $\mu = t\sigma_0$. За допомогою t легко визначити довірчу вірогідність помилки вимірювання з табл. 2.1 [2].

У дослідженнях часто за заданою точністю Δ і довірчою вірогідністю вимірювання визначають мінімальну кількість вимірювань, що гарантують необхідні значення Δ і $\Phi(t)$.

Аналогічно до рівняння (2.7) з урахуванням (2.9) запишемо

$$\mu = \sigma_{\text{arg}} \Phi(P_D) = \sigma_0 / \sqrt{nt}. \quad (2.10)$$

Звідси, вважаючи $N_{min} = n$, маємо

$$N_{min} = \frac{\sigma^2 t^2}{\sigma_0^2} = \frac{K_v^2 t^2}{\Delta^2}. \quad (2.11)$$

Тут K_v — коефіцієнт варіації (мінливості), %; Δ - точність вимірювань, %. Для обчислення N_{min} може бути взята наступна послідовність.

1 Проводять попередній експеримент з кількістю вимірювань n , яка складає залежно від трудомісткості досліджуваного від 20 до 50.

2 Обчислюють середньоквадратичне відхилення σ за рівнянням (2.3).

3 Відповідно до поставлених завдань експерименту встановлюють необхідну точність вимірювань μ , Δ , яка повинна бути не меншою, ніж точність приладу.

4 Встановлюють нормоване відхилення t , значення якого звичайно задають; воно залежить також від точності методу. Наприклад, при великій точності вимірювань можна взяти $t = 3,0$, при малій - $t = 2,0$. Так, вимірюючи зносостійкість матеріалів, можна взяти $t = 2$, густину, міцність, розміри тіл - $t = 2,5-3,0$.

5 З (2.10) визначають N_{min} . Надалі у процесі експерименту число вимірювань не повинне бути менше N_{min} .

Приклад. При прийманні споруд термічного цеху комісія як один з параметрів заміряє їх ширину. Згідно з тимчасовою інструкцією вимагається виконувати 25 вимірювань; відхилення параметра, що допускається, $+ 0,1$ м. Необхідно визначити, з якою достовірністю комісія оцінює даний параметр. Заздалегідь обчислене значення $\sigma = 0,4$ м.

Згідно з інструкцією $\Delta = 0,1$ м. З рівняння (2.11) можна записати $t = \sqrt{n} \cdot \frac{\Delta}{\sigma} = \sqrt{25} \cdot \frac{0,1}{0,4} = 1,25$. Відповідно до табл.

2.1 довірча вірогідність для $t = 1,25$ $P_d = 0,79$. Це низька вірогідність. Похибка, що перевищує довірчий інтервал $2m = 0,2$ м, згідно з виразом (2.8) траплятиметься один раз з $0,79/(1 - 0,79) = 3,76$, тобто з 4 вимірювань. Це неприпустимо. Обчислимо мінімальну кількість вимірювань з довірчою вірогідністю P_d , що дорівнює 0,9 і 0,95. За формулою (2.11) маємо $N_{min} = 0,42 \cdot 1,652 / 0,12 = 43$ вимірювання при $P_d = 0,90$ і 64 вимірювання при $P_d = 0,95$.

Оцінки вимірювань з допомогою σ і σ_0 за наведеними методами справедливі при $n > 30$. Для знаходження меж довірчого інтервалу при малих значеннях застосовують метод, запропонований у 1908 р. англійським математиком В.С.Госсетом (псевдонім Стьюдент). Криві розподілу Стьюдента у разі $n \rightarrow \infty$ (практично при $n > 20$) переходять у криві нормального розподілу (рис. 2.1) [2].

Для малої вибірки довірчий інтервал

$$\mu_{\text{ст}} = \sigma_0 \alpha_{\text{ст}}, \quad (2.12)$$

де $\sigma_{\text{ст}}$ - коефіцієнт Стьюдента, що береться за табл. 2.2 залежно від значення довірчої вірогідності Фст.

Знаючи $\mu_{\text{ст}}$, можна обчислити дійсне значення величини, що вивчається, для малої вибірки

$$x_{\text{д}} = \bar{x} \pm \mu_{\text{ст}} \quad (2.13)$$

Можливе інше поставлення задачі. За n відомими вимірюваннями малої вибірки необхідно визначити довірчу вірогідність $P_{\text{д}}$ за умови, що похибка середнього значення не вийде за межі $\pm \mu_{\text{ст}}$. Задачу вирішують у такій послідовності.

Обчислюють середнє значення \bar{x} , σ_0 і $\alpha_{\text{ст}} = \frac{\mu_{\text{ст}}}{\sigma_0}$. За

допомогою величини $\alpha_{\text{ст}}$, відомого n і табл. 2.2 визначають довірчу вірогідність.

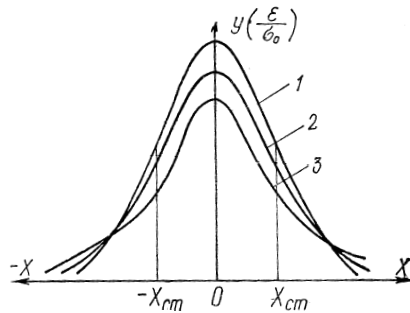


Рисунок 2.1 – Криві розподілу Стьюдента для різних значень n : 1 – $n \rightarrow \infty$; 2 – $n = 10$;
3 – $n = 2$

2.7 Проведення експерименту

Проведення експерименту є найважливішим і найбільш трудомістким етапом. Експериментальні роботи необхідно проводити відповідно до затвердженого плану-програми, і особливо методики експерименту. Розпочина-

ючи експеримент, остаточно уточнюють методику його проведення, послідовність випробувань. Іноді при цьому використовують метод рандомізації, який полягає у тому, що досліди проводять у випадковій послідовності, визначуваній за допомогою переліку випадкових чисел (табл.2.3). Цим способом виключають систематичні помилки, які можуть виникнути при суб'єктивному призначенні послідовності випробувань.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт Стьюдента [2]

n	Значення $\sigma_{ст}$ при P_d					
	0,80	0,90	0,95	0,99	0,995	0,999
2	3,080	6,31	12,71	63,70	127,30	637,20
3	1,886	2,92	4,30	9,92	14,10	31,60
4	1,638	2,35	3,18	5,84	7,50	12,94
5	1,533	2,13	2,77	4,60	5,60	8,61
6	1,476	2,02	2,57	4,03	4,77	6,86
7	1,440	1,94	2,45	3,71	4,32	5,96
8	1,415	1,90	2,36	2,50	4,03	5,40
9	1,397	1,86	2,31	3,36	3,83	5,04
10	1,383	1,83	2,26	3,25	3,69	4,78
12	1,363	1,80	2,20	3,11	3,50	4,49
14	1,350	1,77	2,16	3,01	3,37	4,22
16	1,341	1,75	2,13	2,95	3,29	4,07
18	1,333	1,74	2,11	2,90	3,22	3,96
20	1,328	1,73	2,09	2,86	3,17	3,88
30	1,316	1,70	2,04	2,75	3,20	3,65
40	1,306	1,68	2,02	2,70	3,12	3,55
50	1,298	1,68	2,01	2,68	3,09	3,50
60	1,290	1,67	2,00	2,66	3,06	3,46
∞	1,282	1,64	1,96	2,58	2,81	3,29

Таблиця 2.3 - Перелік випадкових чисел [2]

56	66	25	32	38	64	70	26	27	67	77	40	04	34	63	98
88	40	52	92	29	82	69	34	50	21	74	00	91	27	52	98
87	63	88	23	62	51	07	69	59	02	89	49	14	98	53	41
32	25	21	15	08	82	34	57	57	35	22	03	33	48	84	37
44	61	88	23	13	01	59	47	64	04	99	59	96	20	30	87
94	44	08	67	79	41	61	41	15	60	1	88	83	24	82	24
13	24	40	09	00	65	46	38	61	12	90	62	41	У	59	85
78	27	84	05	99	85	75	67	80	05	57	05	71	70	21	31
42	39	30	02	34	99	46	68	45	15	19	74	15	50	17	44
04	52	43	96	38	13	83	80	72	34	20	84	56	19	49	59
82	85	77	30	16	69	32	46	46	30	84	20	68	72	98	54
38	48	84	88	24	55	46	48	60	06	90	08	83	83	98	40
91	19	05	68	22	58	04	63	21	16	23	38	25	43	32	98
54	81	87	21	31	40	46	17	62	63	99	71	14	12	64	51
65	43	75	12	91	20	36	25	57	92	33	65	95	48	75	00
49	98	71	31	80	59	57	32	43	07	85	06	64	75	27	29
03	98	68	89	39	71	87	32	14	99	42	10	25	37	30	08
56	04	21	34	92	89	81	52	15	12	84	11	12	66	87	47
48	09	36	95	36	20	82	53	32	89	92	68	50	88	17	37
23	97	10	96	57	74	07	95	26	44	93	08	43	30	41	86
43	97	55	45	98	35	69	45	96	80	46	26	39	96	33	60
40	05	08	50	79	89	58	19	86	48	27	98	99	24	08	94
66	97	10	69	02	25	36	43	71	76	00	67	56	12	69	07
15	62	38	72	92	03	76	09	30	75	77	80	04	24	59	67

Припустимо, необхідно визначити послідовність проведення п'яти дослідів. Пронумеруємо їх: 1, 2, 3, 4, 5. Поставимо їм у відповідність будь-які п'ять послідовних чисел, узятих в будь-якому рядку або стовпці випадкових чисел, наприклад, другий рядок: 88, 40 52, 92, 29, тобто 1-88; 2-40; 3-52; 4-92; 5-29. Розмістивши випадкові цифри у порядку зростання (убування), одержимо послідовність проведення дослідів: 5, 2, 3, 1, 4 або 4, 1, 3, 2, 5.

При експериментальному дослідженні складних процесів часто виникають випадки, коли очікуваний результат одержують пізніше, ніж передбачається планом. Тому,

проводячи науковий експеримент, необхідно проявити терпіння, витримку, наполегливість і довести експеримент до отримання результатів.

Особливе значення має сумлінність при проведенні експериментальних робіт. Експериментатор повинен фіксувати всі характеристики досліджуваного процесу, не допускаючи суб'єктивного впливу на результати вимірювань. Іноді дослідники, прагнучи швидше одержати потрібний результат, що підтверджує гіпотезу, вибирають тільки ті експериментальні дані, які добре узгоджуються з теоретичними припущеннями. У цьому випадку іноді упускаються цінні дані про досліджуваний процес, які згодом з труднощами можуть бути відновлені.

У процесі проведення експериментальних робіт недопустима недбалість, яка призводить до великих спотворень, помилок. У зв'язку з цим експерименти повторюють, що збільшує тривалість дослідження.

Обов'язковою вимогою проведення експерименту є ведення журналу. Форма журналу може бути довільною, але повинна найкращим чином відповідати досліджуваному процесу з максимальною фіксацією усіх факторів. У журналі записують тему НДР і тему експерименту, прізвище виконавця, час і місце проведення експерименту, характеристики навколишнього середовища, дані про об'єкт експерименту і засобу вимірювання, результати спостережень, а також інші дані для оцінки одержуваних результатів.

Журнал потрібно заповнювати акуратно, без будь-яких виправлень. При отриманні в одному статистичному ряду результатів, різко відмінних від сусідніх вимірювань, виконавець повинен записати всі дані без спотворень і вказати обставини, супутні вказаному вимірюванню. Це дозволить встановити причини спотворень і кваліфікувати вимірювання як відповідні реальному ходу процесу або як грубий промах. Якщо у процесі вимірювання необхідні прості розрахунки, то вони повинні бути виконані бездоганно.

При проведенні експерименту виконавець повинен безперервно стежити за засобами вимірювань: стійкістю апарата і установок, правильністю їх показань, характеристиками навколишнього середовища, не допускати сторонніх осіб в робочу зону. Виконавець зобов'язаний систематично проводити робочу перевірку засобів вимірювань. У разі, якщо робоча перевірка не забезпечує необхідної точності приладів, експеримент необхідно припинити, а засоби вимірювання передати на капітальну перевірку. Головну увагу експериментатор повинен надавати контролю якості експериментальних робіт, тобто забезпечувати надійність роботи засобів вимірювань, відтворюваність вимірювань, дотримуватися необхідної точності і достовірності одержуваних результатів.

Одночасно з виконанням вимірювань експериментатор повинен проводити попередню обробку результатів та їх аналіз. Тут особливо повинні виявлятися його творчі здібності. Такий аналіз дозволяє контролювати досліджуваний процес, коректувати експеримент, покращувати методику і підвищувати ефективність експерименту.

Важливі при цьому консультації з колегами по роботі і особливо з науковим керівником. У процесі експериментальних робіт необхідно дотримуватися вимог інструкцій з екології, техніки безпеки, пожежної профілактики. Виконавець повинен уміти організувати робоче місце, керуватись принципами наукової організації праці.

Особливо ретельно необхідно дотримуватися вказаних вимог при виконанні виробничих експериментів. Внаслідок великих обсягів робіт і значної їх трудомісткості помилки, допущені у процесі експерименту, можуть істотно збільшити тривалість досліджень і зменшити їх точність.

Спочатку результати вимірювань зводять у таблиці за варійованими характеристиками для різних питань, що вивчаються. Дуже ретельно вивчають сумнівні цифри, різко відмінні від статистичного ряду спостережень, від середніх значень. При аналізі цифр необхідно встановити точність, з

якою потрібно проводити обробку досліджуваних даних. Точність обробки не повинна бути вищою від точності вимірювань [2].

Особливе місце належить аналізу експерименту. Це завершальна частина, на основі якої роблять висновок про підтвердження гіпотези наукового дослідження. Аналіз експерименту - це творча частина дослідження. Іноді за цифрами складно чітко уявити фізичну суть процесу. Тому потрібне особливо ретельне зіставлення фактів, причин, що обумовлюють хід того або іншого процесу і встановлення адекватності гіпотези та експерименту.

2.8 Методи графічного зображення результатів вимірювань

При обробці результатів вимірювань і спостережень широко використовують методи графічного зображення. Результати вимірювань, подані у табличній формі, не дозволяють достатньо наочно характеризувати закономірності процесів, що вивчаються. Графічне зображення дає найнаочніше уявлення про результати експериментів, дозволяє краще зрозуміти фізичну суть досліджуваного процесу, виявити загальний характер функціональної залежності змінних величин, що вивчаються, встановити наявність максимуму і мінімуму функції.

Після обробки результатів вимірювань і оцінки ступеня точності необхідно їх звести у таблиці для аналізу. Дані таких таблиць обробляють графічними методами.

Для графічного зображення результатів вимірювань (спостережень), як правило, застосовують систему прямокутних координат. Якщо аналізується графічним методом функція $y = f(x)$, то наносять у системі прямокутних координат значення $x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n$ (рис.2.2).

Перш ніж будувати графік, необхідно знати хід (течію) досліджуваного явища. Як правило, якісні закономір-

ності і форма графіка експериментатору орієнтовно відомі з теоретичних досліджень.

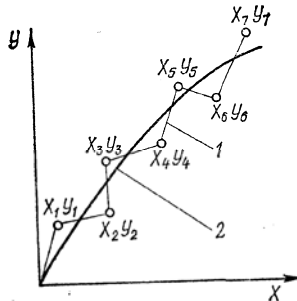


Рисунок 2.2 – Графічне зображення функції $y = f(x)$:
1 – крива за наслідками безпосередніх вимірювань; 2 – плавна крива

Точки на графіку необхідно сполучати плавною лінією так, щоб вона, по можливості, ближче проходила до всіх експериментальних точок. Якщо з'єднати точки прямими відрізками, то одержимо ламану криву. Вона характеризує зміну функції за даними експерименту. Як правило, функції мають плавний характер. Тому при графічному зображенні результатів вимірювань слід проводити між точками плавні криві. Різке викривлення графіка пояснюється похибками вимірювань. Якби експеримент повторили із застосуванням засобів вимірювань вищої точності, то одержали б менше похибок, а ламана крива більше б відповідала плавній кривій.

Проте можуть бути винятки. Так, іноді досліджуються явища, для яких в певних інтервалах спостерігається швидка стрибкоподібна зміна однієї з координат (рис. 2.3). У таких випадках необхідно особливо ретельно сполучати точки кривої. Загальне «усереднювання» всіх точок плавної кривої може призвести до того, що стрибок функції підміняється похибками вимірювань [2].

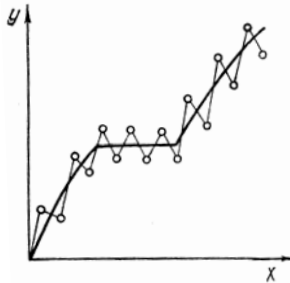


Рисунок 2.3 – Графічне зображення функції $y = f(x)$ за наявності стрибка

Іноді при побудові графіка одна - дві точки різко віддаляються від кривої. Спочатку потрібно проаналізувати фізичну суть явища і якщо немає підстави вважати наявність стрибка функції, то таке різке відхилення можна пояснити грубою помилкою або промахом. Це може виникнути тоді, коли дані вимірювань заздалегідь не досліджувалися на наявність грубих помилок вимірювань. У таких випадках необхідно повторити вимірювання в діапазоні різкого відхилення точки. Якщо колишнє вимірювання виявилось помилковим, то на графік наносять нову точку. Якщо ж повторні вимірювання дадуть колишнє значення, необхідно до цього інтервалу кривої віднести дуже уважно і особливо ретельно проаналізувати фізичну суть явища. Часто при графічному зображенні результатів експериментів доводиться мати справу з трьома змінними: $b = f(x, y, z)$.

У цьому випадку застосовують метод розділення змінних. Одній з величин z в межах інтервалу вимірювань $z_1 - z_n$ задають декілька послідовних значень. Для двох змінних x і y (при $z_i = \text{const}$) будують графіки $y = f_i(x)$. У результаті на одному графіку отримують сім'ю кривих $y = f_i(x)$ для різних значень z (рис. 2.4).

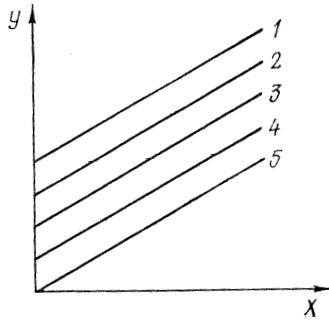


Рисунок 2.4 - Графічне зображення функції $b = f(x, y, z)$:

1 - z_5 ; 2 - z_4 ; 3 - z_3 ; 4 - z_2 ; 5 - z_1

Якщо необхідно графічно зобразити функцію з чотирма і більше змінними $a = f(b, x, y, z)$, то будують серію графіків типу попередніх (рис. 2.4), але кожний з них при $b_1, \dots, b_n = \text{const}$, або приймають з N змінних $N - 1$ постійними і будують графіки: спочатку $N - 1 = f_1(x)$, далі $N - 2 = f_2(x)$, $N - 3 = f_3(x)$ і т.д. Таким чином, можна простежити зміну будь-якої змінної величини у функції від інших при постійних значеннях інших. Цей метод графічного аналізу вимагає ретельності, великої уваги до результатів вимірювань. Проте він у більшості випадків є найпростішим і наочнішим [2].

3 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ

3.1 Вимірювання і вимірювані величини

Вимірювання є одним з найважливіших шляхів пізнання. Його визначають як знаходження значення фізичної величини досліджуванним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання дає кількісну оцінку фізичної величини на основі вимірювального перетворення, при якому встановлюється взаємно однозначна відповідність між розмірами вимірюваної (перетворюваної) і перетвореної величин, зберігаючи для деякої безлічі розмірів перетворюваної величини всі визначені для неї відносини і операції.

Фізична величина - властивість, загальна в якісному відношенні для багатьох фізичних об'єктів (фізичних систем, їх станів і процесів, що відбуваються в них), але індивідуальна у кількісному відношенні для кожного об'єкта. Розмір фізичної величини відображає кількісний вміст у даному об'єкті властивості, відповідної поняттю «фізична величина». Значення фізичної величини - її оцінка у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць [3].

Стосовно системи, що вивчається, вимірювані величини можна поділити на первинні і вторинні. Первинними є ті, які можна вибрати як узагальнені координати, та їх похідні за часом при описі системи, що вивчається (сила, швидкість, напруга, тиск, температура і т. д.). До вторинних відносять величини, які характеризують властивості системи, що вивчається, та їх прояв у первинних величинах. Значення вторинних величин знаходять у процесі обробки даних про первинні вимірювані величини.

Опис властивості, що характеризується даною величиною, здійснюється через інші, раніше певні величини. Ця можливість обумовлюється наявністю об'єктивно існуючих взаємозв'язків між властивостями об'єктів, які можна відобразити системою рівнянь зв'язку між величинами. Але,

оскільки число рівнянь завжди менше від числа вхідних до них величин, прийнято виділяти в окрему групу деякі фізичні величини, число яких повинне дорівнювати різниці між числом величин і числом незалежних рівнянь. Ці величини і відповідні їм одиниці називаються основними величинами і основними одиницями [4]. Вся решта величин і одиниць визначається однозначно через основні і називається похідними. Сукупність основних і похідних величин утворює систему величин. Так само створюються і системи одиниць. У рівняння зв'язку між величинами входять універсальні постійні.

Розмірність фізичної величини - це вираз, що відображає її зв'язок з основними величинами системи. Розмірність величини є добутком основних величин, піднесених до відповідних ступенів. Експерименти у матеріалознавстві зв'язані з необхідністю вимірювання різноманітних фізичних величин: геометричних (лінійних розмірів і кутів, макро- і мікровідхилень форми); кінематичних (швидкостей, прискорень, частот); силових і енергетичних (зусиль, тиску, потужностей); теплових (температур і теплофізичних констант); технологічних (параметрів оброблюваності).

Крім того, при дослідженні технологічних процесів і конструкцій у матеріалознавстві необхідна експериментальна оцінка властивостей машинобудівних матеріалів (міцності, твердості, зносостійкості) і параметрів їх внутрішньої будови (структури, розмірів зерна).

Залежно від характеру зміни вимірюваної величини у часі розрізняють вимірювання статичних величин і динамічних величин.

За способом отримання значення вимірюваної величини вимірювання поділяють на прямі, непрямі, сукупні і сумісні. При прямому вимірюванні шукане значення величини знаходять безпосередньо з досліджених даних. Непрямим називають вимірювання, при якому значення величини

ни визначають на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, які піддаються прямим вимірюванням (наприклад, визначення густини однорідного тіла за вимірною масою, коли відомі його геометричні розміри). Вимірювання, при яких одночасно виконується пряме вимірювання декількох однойменних величин, а шукане значення фізичної величини знаходять рішенням системи рівнянь, називаються сукупними. Сумісними називають одночасні вимірювання двох або декількох не однойменних фізичних величин для знаходження залежності між ними [4].

Засіб вимірювання - технічний пристрій, що використовується при вимірюваннях і має нормовані метрологічні властивості [4].

Принцип вимірювання - сукупність фізичних явищ, на яких базується вимірювання, а метод вимірювання - сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання. У назвах методів, як правило, зазначаються тільки головні відмітні особливості методу, наприклад принцип дії (електродинамічний, оптичний) або прийом використання (безконтактний, урівноваження), або використовувані засоби вимірювання (електричні, пневматичні).

Вимірювальні перетворювачі - технічні пристрої, які здійснюють перетворення величин і утворюють канал передачі вимірювальної інформації. При описі принципу дії вимірювального пристрою, що включає послідовний ряд вимірювальних перетворювачів, часто представляють його у вигляді функціональної блок-схеми (вимірювального ланцюга), на якій відображають функції окремих його частин у вигляді символічних блоків, зв'язаних між собою.

Вимірювальні перетворювачі можна умовно розбити на три класи: пропорційні, функціональні та операційні. Перші призначені для подібного відтворення вхідного сиг-

налу у вихідному сигналі; другі - для обчислення деякої функції від вхідного сигналу; треті - для отримання вихідного сигналу, що є розв'язком деякого диференціального рівняння. Операційні перетворювачі є інерційними, оскільки у них значення вихідного сигналу у будь-який момент часу залежить не тільки від значення вхідного у той самий момент часу, але й від його значень у попередні моменти часу.

За характером зміни вхідних і вихідних сигналів у часі перетворювачі поділяються на безперервні (аналогові), безперервно-дискретні, дискретно-безперервні і дискретні.

3.2 Вимірювання лінійних розмірів

3.2.1 Шкальні засоби вимірювання

Ці засоби призначені для вимірювання довжини, діаметрів і кутів методом порівняння зі штриховою мірою (шкалою) або еталоном. Перший принцип реалізований у штангенінструментах, мікрометричних інструментах і кутомірах типів РОЗУМ і УН. Для підвищення точності відліку у цих пристроях застосовуються ноніуси. Похибки штангенінструментів, що припускається $\pm 0,05$ мм, мікрометри - $\pm 0,004$ мм, кутоміри - $\pm 2' \dots \pm 5'$ [5].

Другий принцип реалізується у важіль-механічних приладах (індикаторах годинникового типу, вимірювальних головках з важіль-зубчатою передачею, пружинних головках). Ці прилади показують на стрілкових шкалах відхилення вимірювального розміру від відомого розміру еталона. Для підвищення точності у них використовуються механіко-механічні вимірювальні перетворювачі. Похибка даних засобів вимірювання знаходиться у межах від 0,01 до 0,0001 мм [5].

3.2.2 Пневматичні вимірювальні прилади

Пневматичні прилади застосовуються для лінійних вимірювань методом порівняння з еталоном. Вони забезпечують високу точність і відносно невеликі витрати часу на вимірювання і дозволяють їх здійснювати безконтактним і контактним методами [5].

На рис. 3.1 показана блок-схема пневматичного ежекторного приладу для безконтактного вимірювання відхилення L розміру вимірюваного виробу 3 від еталона (як правило, блока кінцевих заходів). Стиснуте повітря під постійним надмірним тиском виходить з вхідного сопла 1 безпосередньо у вимірювальне сопло 2 і далі через кільцевий зазор – в атмосферу. Постійність тиску і чистота стиснутого повітря, що подається з джерела 9, забезпечуються стабілізатором тиску 7 і фільтром очищення 8. Тиск у вимірювальній камері 4 залежить від величини зазору. Ця залежність має значну лінійну ділянку (для сопла діаметром 1,75 мм від 0,190 до 0,600 мм). Тиск за допомогою вимірювальної схеми 5 перетвориться у сигнал, зручний для реєстрації індикатором 6.

Найдосконалішою є диференціальна вимірювальна схема, в якій вимірником (рідинним, сифонним або мембранним манометром) визначається різниця тиску у двох гілках системи - робочої і калібрувальної (з регульованим зазором L).

Схема диференціального пневматичного ежекторного приладу для контактного вимірювання відхилення розміру об'єкта показана на рис.3.2. При зміні розміру об'єкта 1 переміщенням штока 2 з кінчною заслінкою змінюється величина кільцевого зазору в соплі робочого пневматичного перетворювача 3, і в його вимірювальній камері встановлюється тиск p , відмінний від тиску P_2 у вимірювальній

камері калібрувального пневматичного перетворювача 4. Різниця тиску ($p_1 - p_2$) вимірюється і перетворюється індикатором 6 в

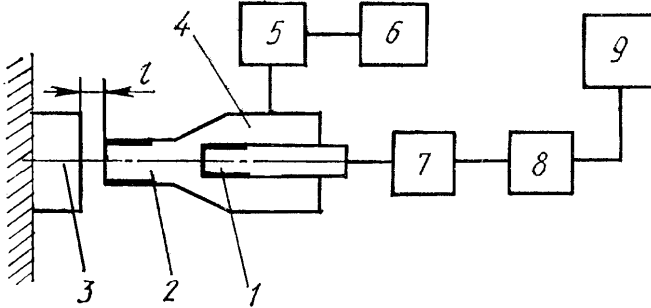


Рисунок 3.1 - Блок-схема ежекторного приладу для вимірювання лінійних розмірів

зручний для реєстрації сигнал. Робота приладу забезпечується стабілізованим джерелом стиснутого повітря 7. Для настроювання на розмір за еталоном служить регульований гвинт 5. Ціна поділки шкали пневматичних приладів для вимірювання довжини низького тиску становить від 0,5 до 5 мкм. Розроблені пневматичні прилади низького і високого тисків з якнайменшою ціною розподілу 0,1 мкм і широким діапазоном вимірювань [5]. Пневматичні прилади дозволяють здійснювати дистанційний контроль, а в поєднанні з механіко-електричними вимірювальними перетворювачами автоматизувати процес реєстрації результатів вимірювання.

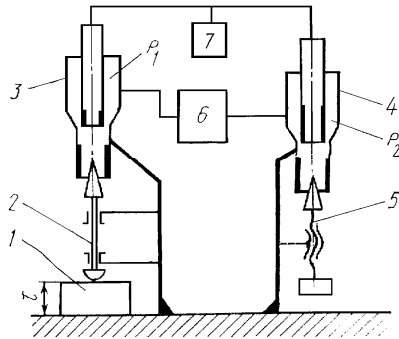


Рисунок 3.2 - Схема диференціального пневматичного ежекторного приладу для лінійних вимірювань

3.2.3 Індуктивні прилади

Індуктивні прилади відрізняються високою точністю, придатні для ведення дистанційних вимірювань, що дозволяє за необхідності автоматизувати процес обробки результатів вимірювань. У індуктивних перетворювачах [5] використовується властивість котушки індуктивності змінювати свій реактивний опір при зміні деяких її параметрів. Для цього один з елементів магнітного ланцюга (якір) виконується рухомим, і від його положення щодо нерухомої частини залежить магнітний опір ланцюга, а отже, й індуктивний опір котушки. Переміщення якоря зв'язується з вимірюваною лінійною або кутковою величиною, при цьому змінюється або повітряний зазор, або площа перетину повітряного зазору площиною, перпендикулярною до вектора магнітної індукції. Для підвищення чутливості індуктивні перетворювачі виконуються диференціальними з підключенням обох котушок у вимірювальну (наприклад, мостову) схему. На рис. 3.3 показана схема індуктивного приладу з диференціальним перетворювачем. При дії об'єкта вимірювань 1 на шток 2 змінюються зазори δ_1 і δ_2

між ярком 3 і магнітопроводами з котушками 4 і 5, які підключені до мостової вимірювальної схеми 6. Сигнал розузгодження через підсилювач 7 подається на індикатор (показуючий або записуючий пристрій) 8. Для роботи приладу необхідне джерело живлення 9.

Індуктивні перетворювачі із змінним зазором мають нелінійну характеристику, тому діапазон вимірювання приладами з таким перетворювачем невисокий (0,1 – 0,3 мм). Індуктивні перетворювачі із змінною площею зазору мають лінійну характеристику, але відносно невисоку чутливість. Їх можна використовувати для вимірювання великих відхилень лінійних або кутових величин. Переважне використання

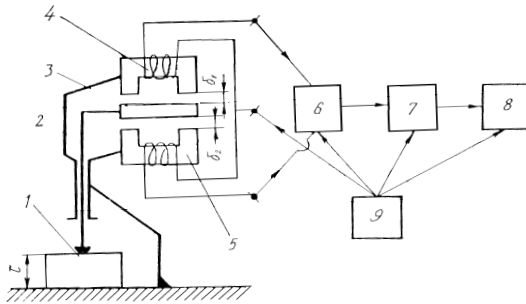


Рисунок 3.3 - Схема індуктивного приладу з диференціальним перетворювачем

аналого-цифрових перетворювачів в індикаторах. Для вимірювання лінійних або кутових величин із значним діапазоном відхилень застосовують індуктивні прилади з диференціальним перетворювачем соленоїдного типу (рис.3.4а). Соленоїдний перетворювач складається з двох котушок 4 і 2, усередині яких поміщене феромагнітне осердя (якір) 3. При переміщенні ярка уздовж осі котушок індуктивність останніх змінюється. Характеристика соленоїдного перет-

ворювача лінійна, а вимірювальні зусилля незначні. В існуючих приладах з підсилювачами ці перетворювачі дозволяють одержати ціну поділки від 0,05 до 1 мкм і межі вимірювання від дуже малих (± 3 мкм) до відносно великих ($\pm 1,5$ мм) [6].

В індуктивних трансформаторних перетворювачах (рис.3.4 б) використовується залежність індуктивного зв'язку між котушками 5 і 7 від положення якоря 6. При симетричному розміщенні якоря струм у вимірнику 8 дорівнює нулю, оскільки первинні котушки 7 (і аналогічно вторинні 5) однакові і включені послідовно. При переміщенні якоря під дією об'єкта вимірювання I із середнього положення магнітні опори, а отже, і магнітні потоки, пронизуючі вторинні котушки, будуть неоднаковими, і у вимірнику з'явиться сигнал, пропорційний різниці індуктованих у вторинних котушках е.р.с. [6].

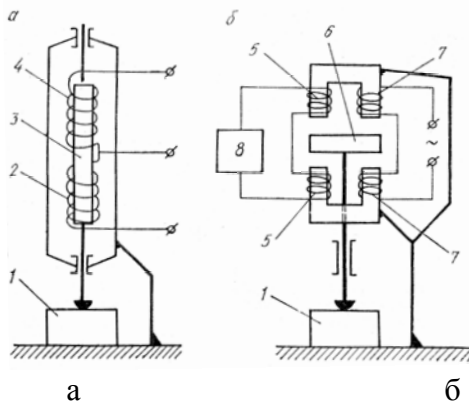


Рисунок 3.4 - Диференціальні індуктивні перетворювачі: *а* - соленоїдного типу; *б* - трансформаторного типу

3.2.2 Механотрони

Механотрон (рис. 3.5) є вимірювальним перетворювачем високої чутливості. Він є діодом з катодом, що підігрівається, причому відстань δ між катодом Do і анодом A змінюється внаслідок змін вимірюваного розміру об'єкта 3 на величину δ . Переміщення анода передається важелем 2 , закріпленим на мембрані 1 . Для підвищення чутливості застосовують, як правило, подвійні діоди. У цьому випадку зменшується вплив коливань живильної напруги і температури. Такі механотрони, включені у мостову вимірювальну схему, при відносно невеликих габаритах (30x80 мм) мають діапазон вимірювань $\pm 0,1$ мм, вимірювальне зусилля ± 100 μ N і варіації показань у межах $\pm 0,04$ μ км [5].

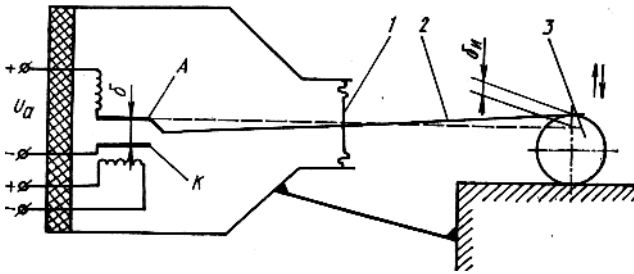


Рисунок 3.5 - Схема механотрона

3.2.3 Оптико-механічні і оптичні прилади

Для контролю лінійних і кутових величин застосовуються оптиметри, оптичні довжиноміри, вимірювальні мікроскопи, катетометри, ділильні головки і столи, інтерферометри.

Оптиметри працюють за принципом оптичного важеля. При переміщенні вимірювального наконечника зображення шкали з ціною поділки 1 μ км, спостережуване в окуляр,

зміщується щодо нерухомого індексу. В оптичних довжиномерах для підвищення точності відліку застосовується окулярний спіральний мікромметр.

Вимірювальні мікроскопи [5] призначені для вимірювання у прямокутних і полярних координатах лінійних і кутових розмірів різальних виробів, різального інструменту, профільних шаблонів та інших виробів, а також відстаней між осями отворів і т.п. У більшості мікроскопів використовуються проєкційний метод вимірювання (у прохідному і відображеному світлі), метод осьового перетину (за допомогою вимірювальних ножів) або контактний спосіб. Вимірювана деталь може базуватися в центрах або на склі столу. Ціна розподілу шкал мікроскопів: відлікової системи вимірювання довжини — від 0,005 до 0,001 мм, кутомірної головки - 1', ноніуса круглого столу - від 30" до 5' [6].

Катетометри застосовуються для вимірювання лінійних розмірів виробів, не доступних для безпосереднього вимірювання. Візирна труба послідовно наводиться на початок і кінець вимірюваного відрізка. Переміщення труби, визначуване на шкалі за допомогою ноніуса або мікроскопа, дорівнює довжині вимірюваного відрізка. Для вимірювання центральних кутів і довжини у полярних координатах застосовуються оптичні ділильні головки. Ціна розподілу у них від 2" до 1'. Вимірювані об'єкти закріплюються у шпинделі головки або у центрах. Для тих самих цілей, що й ділильні головки, застосовують оптичні ділильні столи. Ціна розподілу відлікової шкали у ділильних столах від 1' до 20". Роль фіксатора при вимірюваннях кутів виконують індикатори годинникового типу, вимірювальні головки або автоколіматори.

З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону газові лазери характеризуються найбільшим ступенем когерентності і монохроматичності випромінювання, що генерується ними. Крім того, газові лазери можуть тривалий час працювати при кімнатній температурі без спеціальних пристроїв охолодження, малочутливі до зміни темпера-

тури навколишнього середовища, а випромінюваний ними промінь має малий кут розходження (від $20''$ до $3'$).

Лазерний інтерферометр, призначений для вимірювання довжини і лінійних переміщень [7], показаний на рис.3.6. Випромінювання одночастотного лазера 8 через коліматор 9 йде на світлорозподільний кубик 10, який спрямовує частину випромінювання на рухоме дзеркало, пов'язане з об'єктом вимірювання 1, а іншу частину - на нерухоме дзеркало 11. Відображені від цих дзеркал створюючи випромінювання інтерферують на відокремлюючій площині кубика 2 і через регульовані щілисті діафрагми 7 і 3 прямують на фотоприймачі 4 і 6. Завданням фотоприймачів є перетворення коливань інтенсивності освітленості, що сприймаються у вигляді інтерференційних смуг, у відповідну зміну електричного

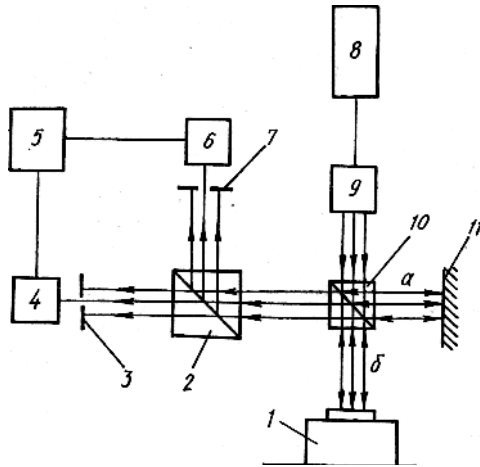


Рисунок 3.6 - Схема лазерного інтерферометра

сигналу на їх виході, яке фіксується відліковим пристроєм 5. Відліковий пристрій забезпечує посилення і формування електричних сигналів обох каналів, зсунутих за фазою на $\pi/2$, їх аналого-дискретне перетворення на фоточутливий

логічній схемі і видачу на реверсивний лічильник сигналів на віднімання або складання залежно від співвідношення фаз обох каналів. Оптична схема інтерферометра забезпечує цикл зміни освітленості фотоприймача при зміні оптичної довжини плеча на половину довжини хвилі випромінювання. Для вимірювання щодо великих переміщень застосовують інтерферометри з кутовими відбивачами. При цьому забезпечується паралель падаючого і відображеного проміння світла і стабілізується просторовий зсув фаз. Нахил кутових відбивних призм до 4° не вносить вагомих помилок в результати вимірювань. Дрейф характеристик фотоприймачів, нулів постійного струму і порогів спрацьовування формувальних пристроїв, а також зміна рівня потужності випромінювання обумовлюють зниження надійності і стабільності одно частотних інтерферометрів. Двочастотні лазерні інтерферометри на відміну від одно частотних після включення володіють практично миттєвою готовністю до роботи. Для них не вимагається посилення вихідного сигналу фотоприймача підсилювачем постійного струму, оскільки постійна складова вихідного сигналу фотоприймача не впливає на роботу приладу [7]. Оптико-електронний вимірювальний пристрій може бути безконтактним лише у тому випадку, якщо поверхня вимірюваної деталі включена в оптичну систему як один з його елементів. У такому разі виключається або обмежується можливість застосування інтерференційних методів, оскільки шорсткість поверхні деталі обумовлює значне спотворення інтерференційного поля і у багатьох випадках неможливість його утворення. Цих недоліків не має пристрій, де використовується геометричне кодування вимірювальної інформації (рис. 3.7). Конструктивно воно виконане у вигляді двох окремих блоків: оптико-електронного перетворювача і цифрового блока. У оптико-електронному перетворювачі використаний лінійний фор-

мувач відеосигналів (ЛФВС) типу А-1034, що має 1024 світлочутливі елементи розміром 15×15 мкм.

Пристрій працює таким чином. Освітлювач 1 за допомогою щілистої діафрагми 2 і проєкційного об'єктива 3 створює на поверхні вимірюваної деталі світловий штрих. Зображення цього штриха через приймальний об'єктив 4 потрапляє на світлочутливу поверхню ЛФВС 5, в якому відбувається перетворення світлового потоку в електричний сигнал.

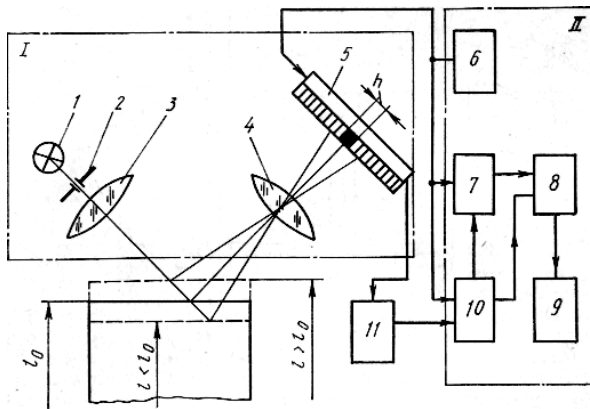


Рисунок 3.7 – Оптико-електронний пристрій для вимірювання лінійних розмірів

При вимірюванні розміру деталі, більшого або меншого від номінального, світловий штрих відхилиться в той або інший бік від нульового положення, засвічуючи світлочутливі елементи з меншими або більшими порядковими номерами. У блоці 10 відбувається визначення положення середини світлового штриха на ЛФВС. Блок усереднювання 7 дозволяє набувати середніх значень розміру за результатами декількох вимірювань (до десяти). У блоці 8 обчислюється фактичний розмір деталі, який потім у цифровій формі відображається в блоці індикації 9. Роботою

приладу керує тактовий блок керування 6, який забезпечує накладення електричних зарядів на світлочутливих елементах залежно від енергії падаючого на них світлового потоку та їх відведення на приймальний блок.

Якщо висота мікронерівностей поверхні деталі R_z становить від 40 до 0,1 мкм, то прилад забезпечує лінійну залежність між сигналами на вході і виході у межах 4 мм, похибка вимірювання 0,01 мм і час вимірювання не більше 0,1 з [8].

3.2.6 Акустичні прилади

В акустичних приладах використовують коливання ультразвукового діапазону і невеликої інтенсивності (менше 1 кВт/см²). Акустичні прилади застосовуються в основному для вимірювання товщини, коли немає доступу до однієї з протилежних поверхонь виробу.

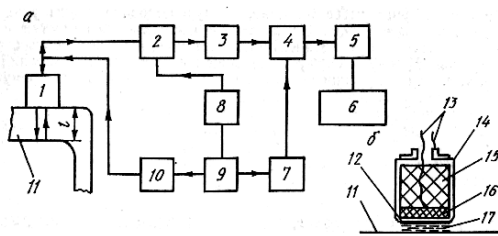


Рисунок 3.8 - Ехоімпульсний товщиномір: а - блок-схема;
б - схема суміщеного п'єзоелектричного шукача

З відомих методів акустичного контролю для вимірювань товщини застосовують луну-метод і рідкий резонансний метод. У першому випадку вимірюється час проходження ультразвукового імпульсу через шар, товщину якого вимірюють, або амплітуда і фаза відображених коливань. У другому вимірювання товщини базується на явищі резонансу в контрольованому виробі або інших інтерференційних явищах при проходженні акустичних хвиль.

Ехоімпульсні товщиноміри застосовуються для вимірювання виробів з чисто обробленими паралельними поверхнями (група А) і грубо обробленими непаралельними поверхнями (група Б). Мінімальна товщина плоских виробів (або стінок), вимірювана приладами групи А, становить 0,2-0,3 мм при абсолютній похибці вимірювання не більше 10 мкм. Товщина вимірюваних стінок труб повинна бути не менше 1 мм. Мінімальна товщина, вимірювана приладами групи В, становить 1,2-1,5 мм при абсолютній похибці вимірювання 0,1-0,2 мм. Максимальна вимірювана товщина - 20-100 мм.

Блок-схема ехоімпульсного товщиноміра показана на рис. 3.8 а. Імпульс ультразвукового випромінювання генератора зондуючих імпульсів, пройдений від шукача 1 шлях L, відображається протилежним боком стінки виробу 11 і повертається у шукач 1, звідки передається в приймач 2. Підсилювач 3 передає відображений сигнал у вимірювальний тригер 4, тривалість імпульсу якого дорівнює часу проходження ультразвукових хвиль у виробі. Для цього у тригер 4 надходить також сигнал від генератора розгортки 7. Блок тимчасового регулювання чутливості 8 призначений для зменшення чутливості приймача 2 у момент випромінювання зондуючого імпульсу і для відновлення її. Блоки 7, 10 і 8 керуються синхронізатором 9. Він забезпечує одночасний (або із затримкою на певний час) запуск генераторів зондуючого імпульсу 10 і розгортки 7. При вимірюванні малої товщини тривалість вихідного імпульсу вимірювального тригера дуже мала. Тому для підвищення точності вимірювання використовують блок множення інтервалу 5. У блоці індикації 6 застосовують стрілкові або цифрові індикатори тривалості імпульсу, вимірювального тригера, використовуючи перетворювач час — напруга. Шукач 1 перетворює електромагнітні коливання в ультразвукові, випромінює ультразвукові хвилі у виріб, приймає відображені хвилі і перетворює їх в електромагнітні.

Схема суміщеного п'єзоелектричного шукача наведена на рис.3.8 б. П'єзопластина 16 приклеєна або притиснута до демпфера 15. Між п'єзопластиною і виробом 11, в який виробляється випромінювання, може розміщуватися декілька тонких проміжних шарів - один або декілька протекторів 12 і прошарок змащувального матеріалу 17. Шукач розміщений у корпусі 14. Виводи 13 сполучають п'єзопластину з генератором 10 і приймачем 2 [9].

П'єзопластина, як правило, має товщину, що дорівнює половині довжини ультразвукової хвилі у п'єзоматеріалі. На протилежних поверхнях пластини розміщуються металеві електроди для підведення змінних електричних зарядів. Демпфер служить для гасіння вільних коливань п'єзопластини, тобто для отримання коротких імпульсів, а також для попередження механічних пошкоджень пластин.

Протектор є пластинкою завтовшки 0,1-0,5 мм з кварцу, сапфіра або смоли з наповнювачем, приклеєною до п'єзоелемента. Він служить для поліпшення акустичного контакту з виробом і захисту п'єзоелемента від абразивного зношування. Корпус забезпечує екранування п'єзоелемента і виводів від магнітних полів.

3.3 Вимірювання температури

3.3.1 Механічні термометри

Механічні термометри базуються на явищі теплового розширення тіл. Ці тіла можуть бути твердими, рідкими або газоподібними. Механічні термометри відрізняються надійністю, точністю, низькою вартістю і простотою обслуговування. Прочитування показань з них, як правило, здійснюється на місці вимірювання. Проте за допомогою механіко-електричного або механіко-гідралічного перетворювача можна передати сигнал на обмежену відстань.

У машинобудуванні застосовують біметалеві, рідинні і газові термометри.

Чутливий елемент біметалевих термометрів виготовляється з пластини, що складається з двох або більше шарів різнорідних металів, зварених між собою по всій площині зіткнення. Пластина може бути заздалегідь деформована. При нагріві біметалевої пластини через відмінність коефіцієнтів лінійного розширення її шарів виникає деформація вигину, пропорційна зміні температури. На рис. 3.9 показані найпоширеніші конструктивні виконання чутливих біметалевих елементів. Варіанти *a* і *б* використовуються головним чином як реле температури, *в* і *г* - для безпосереднього відліку показань термометрів. Для цього один кінець чутливого елемента закріплюється, а інший з'єднується з передавальним або безпосередньо з показуючим пристроєм. Діапазон вимірювання біметалевих термометрів лежить в інтервалі від -50 до 600 °С, причому від 500 до 660 °С термометр можна використовувати тільки короткочасно. Похибка вимірювання - від ± 1 до $\pm 3\%$.

У рідинних термометрах вимірюваною величиною, що характеризує температуру, є зміна об'єму термометричної рідини. Термобалон, в якому міститься основна частина рідини, виготовляється із скла або сталі. До термобалона

підключений капіляр діаметром 0,1-0,2 мм. У скляного термометра капіляр знаходиться поряд зі шкалою безпосереднього спостереження.

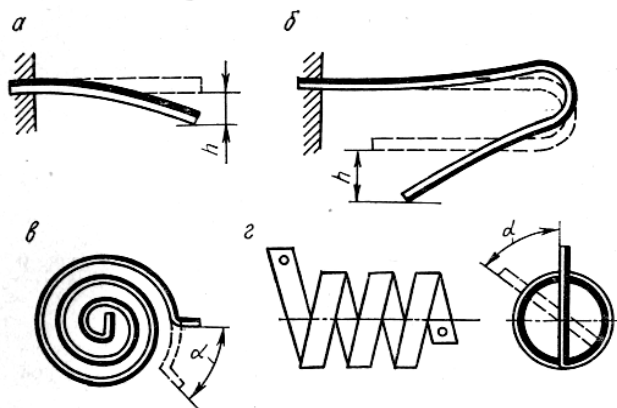


Рисунок 3.9 - Біметалеві вимірювальні перетворювачі температури

У рідинних манометричних термометрів капіляр підключений до манометра, показання якого пропорційні температурі. Довжина капіляра в таких термометрах може досягати 60 м. Чутливий елемент, капіляр і показчик в них утворюють замкнуту, неподільну, герметичну термосистему, яка вмонтовується і демонтується тільки повністю. Діапазон вимірювання термометрів залежить від властивостей термометричної рідини:

- етиловий спирт – від -110° до 210°C ;
- ртуть у вакуумі – від -30° до 150°C ;
- ртуть під тиском – від -30° до 630°C ;
- толуол – від -90° до 110°C ;
- толуол під тиском – від -90° до 230°C .

Похибки вимірювання температури за допомогою рідинних механічних термометрів обумовлені відмінністю температур рідини у термобалоні і в капілярі і залежать

також від довжини капіляра. Для підвищення точності у рідинних манометричних термометрах застосовується компенсаційний капіляр. Похибка у такому випадку зменшується з $\pm 2\%$ до $\pm 0,5\%$ [10].

Основними недоліками механічних термометрів є значна інерційність і неможливість об'єднання з іншими інформаційними сигналами для подальшої обробки. Тому у машинобудуванні температуру вимірюють в основному термометрами, принцип дії яких ґрунтується на зміні електричних властивостей речовин при зміні температури.

3.3.2 Електричні контактні термометри

Усі види електричних контактних термометрів поділяються на дві групи: термометри опору, в яких із зміною температури змінюється активний опір чутливого елемента, і термоелектричні термометри (термопари), де при зміні температури первинного перетворювача змінюється його е.р.с. У металевих провідників опір звичайно зростає з підвищенням температури, а у напівпровідникових - спадає.

Частіше всього застосовуються платинові або мідні термометри опору, кожний з яких має номінальний опір R_0 , при 0°C в межах від 1 до 500 Ом. При температурах вище 0°C залежність опору платинових термометрів від температури має вигляд

$$RT = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (3.1)$$

де $A = 3,9685 \cdot 10^{-3}$; $B = -5,847 \cdot 10^{-7}$; T - абсолютна температура, К. Сфера застосування технічних платинових термометрів від -260 до 110°C .

Температурна залежність опору мідних термометрів

$$RT = R_0(1 + \alpha T), \quad (3.2)$$

де $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}$.

Мідні термометри можуть працювати в інтервалі температур від -50 до 200°C .

У чутливих елементах платинових і мідних термометрів опору тонкий дріт (0,05 – 0,1 мм) намотується на каркас ізоляційного матеріалу, наприклад кварцу, або дротяна спіраль поміщається в керамічний каркас, а спіраль заповнюється ізолюючим порошком і забезпечується герметизація чутливого елемента [10].

Напівпровідникові термометри опору випускаються для вимірювання температури в діапазоні від -200° до 300°C . Звичайно кожен такий термометр вимагає індивідуального градуювання. Залежність опору напівпровідникових термометрів від температури приблизно описується виразом

$$R_T = R_0 \exp B(1/T - 1/T_0), \quad (3.3)$$

де R_0 - опір при еталонній температурі T_0 ; R_T - опір при вимірюваній температурі T ; B - параметр, що залежить від матеріалу перетворювача ($B = 3000\text{-}4000 \text{ K}$); T - абсолютна температура об'єкта, K .

Хоча велика нелінійність характеристики перетворювача є небажаною через ускладнення вимірювальної схеми терморезисторів, проте напівпровідникові термометри опору дістали поширення у лабораторній і виробничій практиці завдяки високій чутливості, простоті, міцності, транспортабельності і можливості використання без додаткового підсилювача. Оскільки опір напівпровідникових термометрів лежить в інтервалі від 1 КОм до 1 МОм, то можна знехтувати зміною опору клем і сполучних дротів. Чутливі елементи напівпровідникових термометрів складаються головним чином із сумішей оксидів металів, які при високій температурі сплавляються у формі маленьких пластинок, стрижнів або кульок. Завдяки малим розмірам забезпечуються гарні динамічні властивості таких термометрів.

Для вимірювання опору термометрів використовуються автоматичні мости і логометри, які живляться постійним, а іноді і змінним струмом. На рис. 3.10 показана схе-

ма вимірювального ланцюга металевого термометра опору з три дротяною лінією зв'язку. Три плеча моста складають манганінові резистори R_1 , R_2 і R_3 . Четверте плече складається з перетворювача термометра R_K і підганяльних резисторів (на схемі не показаних). Послідовне з'єднання кожного з дротів, що підводять, відповідно з резисторами R_1 і R_3 дозволяє автоматично компенсувати вплив коливань їх температури на результат вимірювання. Свідчення логометра, рамки якого 1 і 2 підключені до двох точок моста безпосередньо і до однієї через резистор R_4 , пропорційні зміні опору первинного перетворювача температури R_K .

Похибка металевих термометрів опору залежно від виконання становить від $\pm 0,5\%$ до $\pm 3\%$, а у напівпровідникових $\pm 0,5\%$. За рахунок спеціального відбору та індивідуального градуювання можна знизити похибку напівпровідникових термометрів опору до $\pm 0,01^0 \text{ C}$ [10].

Принцип дії термоелектричного термометра (термопары) базується на термоелектричному явищі, в результаті якого у ланцюзі, що складається з двох різнорідних провідників, виникає термоє.р.с., що залежить від температури у місцях з'єднань цих провідників. Для вимірювання температури одне із з'єднань різнорідних провідників (робочі кінці) поміщають в середовище, температуру якого вимірюють, а температура іншого з'єднання (вільних кінців) відома. Термоє.р.с. термоелектричного термометра не зміниться, якщо в його ланцюг буде включений третій провідник або вимірювальний прилад і температура місць його з'єднання буде однаковою. Вільні кінці термоелектричного термометра потрібно розміщувати у місці, зручному для стабілізації або вимірювання температури. Для цього застосовують подовжувальні (компенсаційні) дроти, які приєднують до термоелектродів.

Залежність між термоє.р.с. і різницею температур робочих і вільних кінців у загальному випадку є нелінійною і може бути апроксимована рівнянням третього ступеня.

Якщо звужити діапазон вимірюваних температур, то характеристики багатьох термопар можуть бути лінеалізовані без великого збитку для точності вимірювань.

Залежність термoe.р.с. від вимірюваної температури для найбільш споживаних пар матеріалів, характеристики

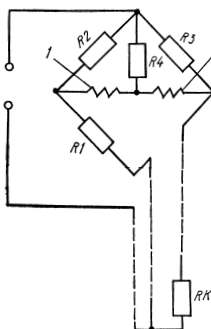


Рисунок 3.10 - Схема вимірювального металевого термометра опору

яких наведені в табл. 3.1, показана на рис.3.11 (температура вільних кінців 0°C).

Якщо контрольна температура вільних кінців відрізняється від нуля і підтримується такою, наприклад, що дорівнює 20°C , то в заміряне значення термoe.р.с. слід внести поправку, яка відповідає відхиленню контрольної температури t_a від 0°C . Позитивним вважається той електрод, від якого йде струм до спая термопар при $t > t_a$. При позначенні термопар на першому місці вказується матеріал позитивного електрода. Окрім вказаних у табл. 3.1, застосовуються також залізоконстантанові (діапазон вимірювання від -250° до 700°C) і мідноконстантанові (від -250° до 400°C) термоелектричні перетворювачі.

Похибка вимірювання температури становить від 0,25 % для перетворювачів типу ТПП і до 0,8 % - для ТХА [10].

Окрім стандартних термоелектричних термометрів, у лабораторній практиці і при дослідженнях застосовуються і нестандартні. Але всі нестандартні засоби вимірювання температур вимагають індивідуального градування.

На рис. 3.12 наведена схема вимірювання температури

Таблиця 3.1 - Характеристики термоелектричних перетворювачів

Тип перетворювача	Матеріал термоелектродів	Термоелектроди		Діапазон температур (тривало), °С	Межа тимчасового застосування, °С
		позитивні	негативні		
ТПП	Платинородій - платина	10% Rh; 90% Pt	100% Pt	0 – 1300	1600
ТХА	Хромель – алюмель	Хромель	Алюмель	(-50) – 1000	1300
ТХК	Хромель – копель	Хромель	Копель	(-50) – 600	800

у зоні різання за допомогою так званої однорізцевої і дворізцевої природної термопари. Перемикання режимів роботи виконується трипозиційним перемикачем 5. Для однорізцевої термопари замикаються контакти а - а або с - с. Тоді термoe.p.c., що утворюється у місці контакту стружки з матеріалу деталі 1 і передньої грані різальної пластинки різця 2 із сталі Р18 (або різця 3 з твердого сплаву Т15К6), вимірюється, посилюється і реєструється приладом 6. Для зняття термoe.p.c. з деталі, що обертається, застосовується ртутний струмознімач 7 з гнучким електродом, що обертається. При замиканні контактів з - з утворюється природна дворізцева термопара Р18 — Т15К6. При замиканні контактів а - а необхідна ізоляція 4 різці і деталь, а для дворізцевої термопари достатньо ізолювати тільки різці. Але при

дворізцевій обробці важко створити однакові температури у зоні різання обох різців, оскільки їх матеріали мають різну теплопровідність. Експерименти показали, що відмінність у показаннях одно- і двоінструментних термопар становить 7-9%. Правильне тарування природних термопар є важливою проблемою, оскільки від

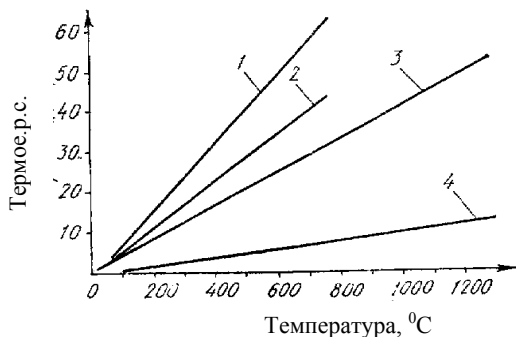


Рисунок 3.11 - Характеристика найбільш споживаних термоелектричних перетворювачів:

- 1 – хромель-копель; 2-залізо - константан;
3 - хромель - алюмель; 4 - платиноводій – платина

його якості залежить достовірність результатів вимірювань. При таруванні бажано створити умови контакту, близькі до реальних, що особливо важливе для інструменту, забезпеченого пластинками з твердих сплавів [11].

3.3.3 Безконтактні методи вимірювання температури

Поверхня будь-якого нагрітого тіла випускає електромагнітне випромінювання. Прилади, які можуть за тепловим

випромінюванням визначати температуру випромінювача, називаються пірометрами.

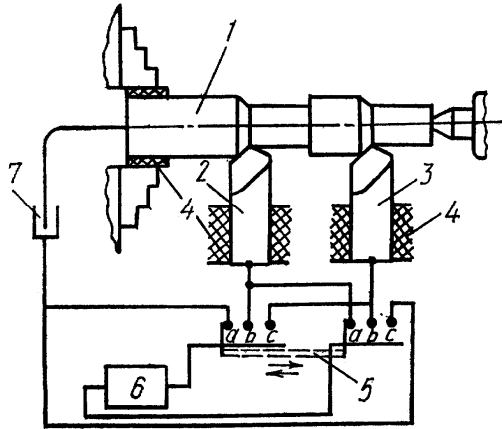


Рисунок 3.12 - Схема вимірювання температури в зоні різання за допомогою природних термопар

За допомогою оптики випромінювання нагрітого тіла фокусується і прямує на приймач. Розрізняють такі види приймачів теплового випромінювання: термопари, термометри опору, фотоелементи, фоторезистори, фотодіоди і фототранзистори. Чутливість термопар і термометрів опору практично не залежить від довжини хвилі, включаючи ультрафіолетову та інфрачервону області випромінювання. Тому вони придатні для вимірювання порівняно низьких температур (до 1500°C). Решта приймачів випромінювання є чутливими тільки у вузькому спектральному інтервалі, їх характеристики сильно залежать від довжини хвилі. Але абсолютна чутливість у них істотно більша, ніж у термопар або термометрів опору.

Пірометричні оптичні пристрої створюють зображення випромінювальної поверхні (або її ділянки) на приймачі і

тим самим роблять вимірювання потоку випромінювання у широкому діапазоні незалежним від відстані до об'єкта, що вивчається. Лінзи обмежують і нерівномірно пропускають вимірюване випромінювання, коефіцієнт пропускання залежить від довжини хвилі. Використання лінз стає неприйнятним при вимірюванні порівняно низьких температур, коли випромінюються хвилі великої довжини (інфрачервоний діапазон). У цих випадках потрібно використовувати увігнуті дзеркала [10].

Радіаційні пірометри (пірометри повного випромінювання) - прилади, які сприймають випромінювання у всьому спектральному діапазоні і перетворюють його у відповідний сигнал. Випромінювання (рис. 3.13) через захисну плівку 6, що проникає через інфрачервоне проміння, потрапляє на сферичне дзеркало 4, яке фокусує його на теплоприймачі 5, що є зіркоподібною термобатареею з ряду послідовно сполучених V-образних хромель-копельових або ніхром-константанових термопар 2. Вільні кінці термопар приварені до металевих смужок 1, які приклеєні до кільця 3 із слюди. Це кільце закладається між такими самими двома. Плоскі робочі кінці термопар утворюють віночок, зачорнений з одного боку. На цей віночок фокусується випромінювання. З підвищенням вимірюваної температури зростає похибка вимірювання за рахунок впливу температури кожуха. Для компенсації температурної похибки термобатарей підключається до вимірювального приладу 7 через ряд резисторів. Резистори R_2 і R_1 виготовляються з міді або нікелю і розміщуються біля кінців термобатарей, решта плечей моста виконана у вигляді резисторів з манганіна. Міст компенсує постійну складову похибки, а резистор R_1 , ввімкнутий паралельно до термобатарей, компенсує змінну складову, пов'язану із зміною температури [12].

Для приладів з межами вимірювань 400-1200⁰С замість сферичного дзеркала застосовують лінзи з кварцового скла, що характеризуються малим поглинанням інфрачервоного проміння.

Застосування радіаційних пірометрів можливе лише у тих випадках, коли повна потужність випромінювання об'єкта вимірювання мало відрізняється від повної потужності випромінювання абсолютно чорного тіла при тій самій температурі. Більшість закритих печей і топків з невеликими отворами і вікнами задовольняють цю умову.

У промисловості застосовуються також кольорові пірометри. У них визначається відношення інтенсивності

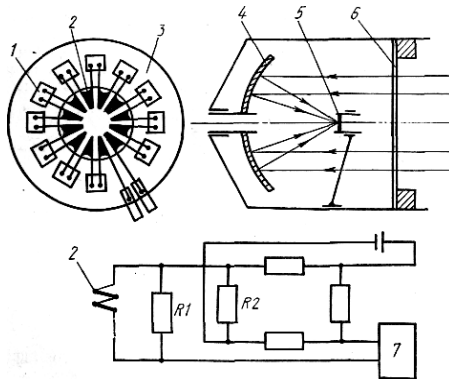


Рисунок 3.13 - Схема радіаційного пірометра

випромінювання даного тіла у промінні двох, заздалегідь вибраних довжин хвиль. Це відношення для кожної температури буде різним і цілком однозначним. Отже, воно може бути критерієм абсолютної температури тіла. Колірні пірометри застосовуються, як правило, з фотоелементом, тобто є фотоелектричними пірометрами. Переваги їх перед радіаційними: зменшення похибки, пов'язаної з неповнотою випромінювання; незалежність показань від відстані до випромінюючої поверхні і розмірів останньої.

Принцип дії фотоелектричного кольорового пірометра ілюструється на рис. 3.14. Випромінювання від об'єкта дослідження 1 лінзою 2 фокусується на об'єктиві 3, який

обертається синхронним електродвигуном 4, і потім сприймається фотоелементом 5. На диску обтюратора є ряд отворів, половина яких закрита червоним світлофільтром, а половина - синім. Таким чином, на фотоелемент по черзі потрапляють то червоне, то синє проміння. Крім того, завдяки отворам фототек, виявляється промодульованим з несучою частотою, визначуваною числом отворів в обтюраторі і частотою обертання останнього. Модульований струм в навантаженні фотоелемента через підсилювач 6, який забезпечений пристроєм 7 для автоматичного регулювання чутливості, надходить у фазочутливий випрямляч 8. Після цього за допомогою комутатора 9 сигнал розділяється відповідно до співвідношення інтенсивностей червоного і синього проміння і сприймається вимірником співвідношення 10. Необхідність у регулюванні чутливості підсилювача, тобто у стабілізації вихідної напруги, обумовлена тим, що при підвищенні вимірюваної температури яскравість випромінювання як у синій, так і в червоній області спектра зростає значно сильніше, ніж співвідношення цих яскравостей. При належному режимі роботи фотоелемента фотоелектричні колірні пірометри можуть забезпечити вимірювання температури з похибкою, що не перевищує 1% [13].

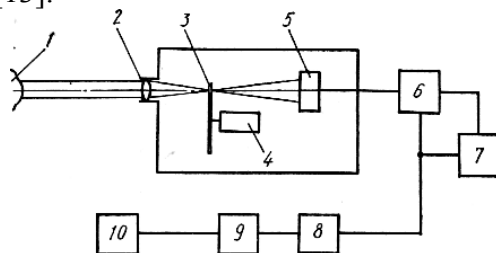


Рисунок 3.14 - Схема фотоелектричного кольорового пірометра

3.3.4 Кольорові індикатори температури

Кольорові індикатори температури (термоіндикатори) - це речовини, що змінюють свій колір залежно від температури. За принципом дії термоіндикатори підрозділяються на чотири основні типи: термохімічні; плавлення; рідкокристалічні; люмінесцентні [13].

Термохімічні індикатори - складні речовини, які, достигнувши певної температури, різко змінюють свій колір за рахунок хімічної взаємодії компонентів. Вони забезпечують точність вимірювання температури у межах від 5 до 100С.

Термоіндикатори плавлення змінюють колір внаслідок плавлення одного або декількох їх компонентів, що мають строго певну температуру плавлення. Похибка вимірювання температури цими індикаторами становить 0,5-1,5, рідше 2,5%, що приблизно відповідає точності вимірювання температури найпоширенішими вимірювальними приладами.

Рідкокристалічні термоіндикатори - речовини, які в певному інтервалі температур переходять в рідкокристалічний стан, маючи властивість при незначній зміні температури (іноді у межах десятих часток градуса) так змінювати свою структуру, що падаючий на них промінь світла розкладається і відображається зі зміною кольору.

Люмінесцентні термоіндикатори залежно від температури змінюють або яскравість, або колір, або колірний тон випромінювання. Похибка вимірювання температури термоіндикаторами двох останніх типів становить 0,1-0,5%.

За здатностями до фізико-хімічних перетворень термоіндикатори поділяють на три групи: оборотні, необоротні та квазіоборотні. До оборотних відносять термоіндикатори, які, змінюючи колір після нагрівання до або вище за температуру переходу, відновлюють первинний колір при зниженні температури нижче за критичну. Такі термоіндикатори можна використовувати багато разів. Необоротні

індикатори названу властивість не мають, і їх первинний колір після охолодження не відновлюється. Квазіоборотні термоіндикатори відновлюють первинний колір при зниженні температури поступово, під впливом вологи, що є в повітрі. Їх також можна використовувати багато разів.

Термоіндикатори плавлення є тільки необоротними, а рідкокристалічні і люмінесцентні - оборотними. Термохімічні індикатори можуть бути оборотними, необоротними і квазіоборотними.

Ряд термоіндикаторів має один строго певний температурний перехід, а інші мають їх декілька. Термоіндикатори плавлення змінюють свій колір одноразово, інші - багатократно.

Серійно випускаються термоіндикатори трьох типів: термохімічні у вигляді фарби і олівців; термоіндикатори плавлення у вигляді фарби; рідкокристалічні у вигляді порошку або його розчину в хлороформі.

До складу всіх термоіндикаторів входять чотири компоненти: термопігменти, зв'язуючі, розчинники і наповнювачі. Термопігменти є обов'язковою складовою частиною термоіндикаторів. Склад і характеристики деяких термопігментів, що входять до складу термохімічних необоротних індикаторів, наведені у табл. 3.2, 3.3, а термопігментів, що входять до складу термоіндикаторів плавлення, - у табл.3.4. Одні речовини з наведених у табл. 3.4 при плавленні змінюють лише колірний відтінок, інші – різко змінюють колір.

Температура переходу термоіндикаторів залежить від умов нагріву. Із збільшенням швидкості нагріву і тиску температура дещо збільшується.

Таблиця 3.2 - Характеристики необоротних термопігментів, що одноразово змінюють колір

Назва і хімічна формула	Колір до нагрівання	Температура переходу, °С	Колір після нагрівання
Фторсилікат кобальту CoSiF_6	Блідо-рожевий	100	Яскраво-рожевий
Метаванадій амонію NH_4VO_3	Білий	150	Коричневий
Азотнокислий свинець $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Безбарвний	215	Червоний
Кобальт шавлевокислий CoC_2O_4	Світло-червоний	280	Чорний
Карбонат кадмію CdCO_3	Білий	360	Коричневий
Окисел свинцю PbO	Червоний	489	Жовтий
Сульфід кобальту CoS	Сірий	680	Червоний

Таблиця 3.3 - Характеристики необоротних термопігментів, що багаторазово змінюють колір

Назва і хімічна формула	Колір до нагрівання	Температура переходу, °С	Колір після нагрівання
Кобальт-амоній фосфорнокислий $\text{NH}_4\text{CoPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Пурпурний	140 500	Синій. Сіро-голубий
Тіосульфід натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	Безбарвний	300 600	Жовтий. Темно-жовтий
Пірофосфат марганцю амонію $\text{NH}_4\text{MnP}_2\text{O}_7$	Фіолетовий	320 480	Сірий. Білий
Комплексна сполука $3(\text{NH}_4)_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{MoO}_3 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	Білий	110 300 380	Блідо-жовтий. Чорний. Темно-жовтий
Суміш карбонату кадмію із сіркою 2 частини CdCO_3 + 1 частина S (за масою)	Білий	275 370 410	Коричневий. Чорний. Цегляний

Таблиця 3.4 - Характеристики термопігментів для

індикаторів плавлення

Назва і хімічна формула	Колір до нагрівання	Температура плавлення, °С
Цинк бромнуватокислий $Zn(BrOs)_2$	Безбарвний	100
Амоній родановий NH_4SCN	Безбарвний	149,6
Мідь сірчанооксида $CuSO_4$	Зеленувато-білий	200
Натрій мурашинокислий $NaHCO_2$	Білий	283
Селен хлористий $SeCl$	Безбарвний	305
Кадмій азотокислий $Cd(NO_3)_2$	Безбарвний	350
Натрій сірчаноокислий $Na_2S_2O_7$	Білий	400,9
Перекис барію BaO_2	Безбарвний	450
Мідь бромиста $CuBr_2$	Чорний	498
Калій ренієвокислий $KReO_4$	Білий	550
Залізо йодне FeJ_2	Сірий	592
Олово селенисте $SnSe_4$	Білий	650
Літій молібденовокислий Li_2MoO_2	Білий	705
Свинець кремнекислий $PbSiO_3$	Безбарвний	766
Германій сірчистий GeS_2	Білий	800
Натрій вуглекислий Na_2CO_3	Білий	852
Кальцій азотний Ca_2N_3	Коричневий	900
Калій борнокислий $K_2B_2O_4$	Безбарвний	947
Залізо миш'яковисте $FeAs_3$	Срібно-сірий	990
Натрій сірчаноокислий $Na_2S_2O_7$	Білий	400,9

Термоіндикатори наносяться на поверхню об'єкта дослідження у вигляді тонкої плівки. Залежно від способу підведення тепла до об'єкта температура індикатора дещо вища або нижча вимірювальної. Але це відмінність незначна [13].

3.4 Механічні випробування

3.4.1 Статичні випробування

При статичних випробуваннях для визначення характеристик міцності і пластичності досліджуваній зразок піддається дії постійного або повільного навантаження, що плавно збільшується, і дає можливість вимірювати з достатньою точністю навантаження, прикладене до зразка, і деформацію останнього у будь-який момент випробування. Найпоширенішим є випробування на розтягування. При цьому гладкий ненадрізаний зразок розтягують у випробувальній машині у напрямку його осі до розриву, а залежність між розтягальною силою і зміною довжини зразка реєструють у вигляді діаграми «навантаження - абсолютне подовження». Якщо навантаження F віднести до початкової площі поперечного перерізу зразка F_0 , а подовження $\Delta \ell$ - до початкової розрахункової довжини ℓ_0 , то одержимо діаграму «напруга - відносне подовження» (рис 3.15).

На початковій стадії випробування відносне подовження пропорційно напрузі (до точки а). Ця ділянка діаграми дозволяє визначити модуль пружності

$$E = \frac{m_1}{m_2} \operatorname{tg} \beta, \quad (3.4)$$

де m_1 - масштаб напруг, МПа/мм; m_2 - масштаб відносних деформацій, мм⁻¹; β - кут нахилу прямолінійної ділянки діаграми.

Межа пружності σ_y є максимальною напругою, при якій після розвантаження зразка не спостерігаються залишкові пластичні деформації. Точно визначити цей параметр практично неможливо, тому технічною умовною межею пружності ($\sigma_{0,01}$) називають напругу, при якій відносна залишкова деформація становить 0,01 %.

При подальшому підвищенні навантаження спостерігається зростання пластичної деформації, і для багатьох ма-

теріалів на діаграмі можна виділити так звану полицку плинності, коли деформація збільшується при постійній напрузі. Відповідну напругу називають границею текучості σ_T . Для матеріалів без чітко вираженої полицки плинності визначається умовна межа плинності ($\sigma_{0,2}$), яка відповідає відносній залишковій деформації 0,2 % [14].

При напругах, що перевищують границю текучості, залежність між деформаціями і напругами нелінійна. Коли здатність до деформації зразка вичерпана, настає руйнування при навантаженні, що відповідає ділянці підйому кривої «напруга - деформація», або (у пластичних матеріалів) при деформації, що відповідає ділянці, яка знижується, кривої на діаграмі розтягування. Максимальну умовну

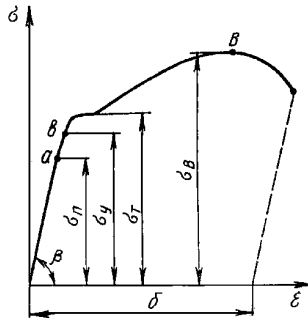


Рисунок 3.15 - Діаграма розтягування сталі

напругу - відношення максимальної розтягальної сили до початкової площі поперечного перерізу зразка - називають тимчасовим опором σ_B .

Випробування на розтягування дозволяють також оцінити пластичні властивості матеріалу, які характеризуються, як правило, відносним подовженням після розриву δ .

Аналогічні характеристики отримують при випробуванні на стиснення, вигин і кручення.

Для оцінки поведінки матеріалу при підвищених температурах проводять випробування на тривалу міцність до

того часу, поки при даній температурі і навантаженні не буде досягнута максимальна залишкова деформація або відбудеться руйнування зразка.

При цих випробуваннях визначають границю тривалої міцності і границю повзучості. Границею тривалої міцності називають максимальну (умовну) напругу, яка може витримати зразок без руйнування при даній температурі протягом необмежено довгого часу. Границя повзучості при певній температурі - максимальна (умовна) напруга, при якій швидкість повзучості за певний час випробування (25-35 ч) не перевищує 10^{-4} %/г. При цьому відносне залишкове подовження не повинне перевищувати 0,2% після 45 ч випробування під навантаженням. Границі міцності і повзучості визначають для сталей в інтервалі температур 350-700°C [3].

3.4.2 Випробування ударним навантаженням

Випробування на ударний вигин дозволяють оцінити опір крихкому руйнуванню в'язких матеріалів. Для цього стандартний зразок (рис.3.16 а), вільно встановлений на опори копра, руйнується за один удар важкого маятника з боку, протилежного надрізу (рис. 3.16 б). Окрім U-подібного концентратора, показаного на рис. 3.16, застосовуються V-подібні з кутом розчину 45° і радіусом округлення 0,25 мм. Швидкість маятникового копра у момент зіткнення залежить від кута падіння α і звичайно лежить в інтервалі 5-7 м/с. Кількісною характеристикою в'язкості при ударному руйнуванні є відношення роботи W_k , необхідної для руйнування зразка, до площі його поперечного перерізу, вимірної у площині симетрії надрізу. Цей параметр $a_k = \frac{W_k}{F_0}$

(Дж/м²) округлюють до цілого числа і називають ударною в'язкістю. Поглинену при руйнуванні зразка роботу можна визначити за формулою

$$W_k = mgl(\cos\beta - \cos\alpha), \quad (3.5)$$

де m - маса маятника копра; l - його довжина; β - кут підйому маятника після руйнування зразка; g - прискорення вільного падіння.

Залежність ударної в'язкості сталі від температури показана на рис. 3.17. У діапазоні температур, менших t_1 , відбувається крихкий злом, а великих t_2 - в'язкий. Якщо $t_1 < t < t_2$, то спостерігається змішаний злом. Значення $t_2 - t_1$ залежить від структури сталі, виду її термічної обробки, попередньої холодної пластичної деформації зразка і його старіння.

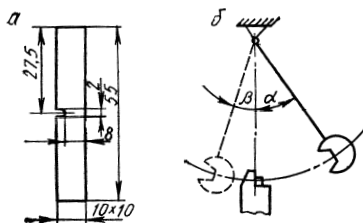


Рисунок 3.16 - Випробування зразка на ударну в'язкість:
а - зразок; б - схема випробування

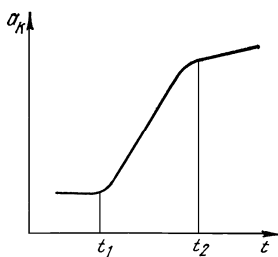


Рисунок 3.17 - Залежність ударної в'язкості сталі від температури випробування

Окрім випробування ударом на вигин (але значно рідше), застосовують випробування ударом на розтягування і скручування [3].

3.4.3 Випробування циклічним навантаженням

При циклічних навантаженнях в досліджуваному зразку відбувається поступове накопичення пошкоджень, що призводять до зміни властивостей, утворення тріщин, їх розвитку і руйнування. Цей процес називають утомленістю. Параметрами циклічного навантаження є: середня напруга циклу $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$, амплітуда напруги σ_a , частота циклів f (або період T циклу), коефіцієнт асиметрії $R_a = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ (рис. 3.18). Цикл, у якого максимальна і мінімальна напруги однакові, але протилежні за знаком, називається симетричним.

Схема навантаження повинна тією чи іншою мірою відтворити у зразках напружений стан, характерний для експлуатаційних умов роботи деталі, оскільки від співвідношення дотичних і нормальних напруг залежать опір утомному руйнуванню і характер руйнування.

Характеристиками опору утомленості матеріалу є: границя витривалості σ_k - максимальна напруга циклу з коефіцієнтом асиметрії R , що відповідає заданому (базовому) числу циклів напруги; границя витривалості при симетричному циклі $\sigma-1$; циклічна довговічність N — загальне число циклів, витриманих навантаженим об'єктом до утворення утомної тріщини певної протяжності або до утомного руйнування.

Для визначення границі витривалості випробовують 10-15 однакових зразків. Для першого зразка максимальна напруга звичайно становить $0,75\sigma_b$.

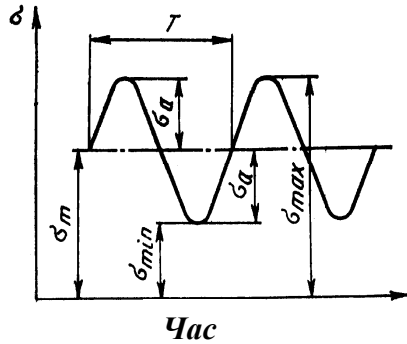


Рисунок 3.18 - Схема вимірювання навантаження на зразок при випробуванні на утомленість

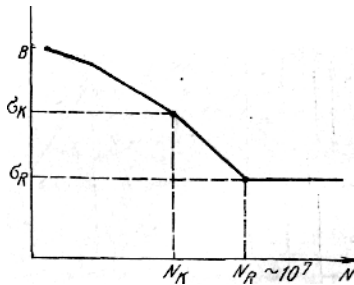


Рисунок 3.19 - Типова схема результатів випробування на утомленість

Визначається число циклів навантаження, яке він витримує до руйнування N_1 . Напруги при випробуванні другого зразка призначаються залежно від N_1 .

При $N_1 < 2 \cdot 10^5$ $\sigma_2 = \sigma_1 - 20$ МПа, при $N_1 > 2 \cdot 10^5$ $\sigma_2 = \sigma_1 + 20$ МПа. Максимальна напруга циклу для кожного подальшого зразка знижується на 8-12% до того часу, поки i -й зразок не витримає без руйнування базове число циклів навантаження.

Уточнення межі витривалості здійснюється при випробуванні декількох інших зразків, для яких $\sigma_i = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$. На рівні межі витривалості повинно бути випробувано не менше трьох зразків. За наслідками випробувань будується крива утомленості (рис. 3.19). Критична напруга σ_k , вище за яку вже з перших циклів навантаження виникають субмікроскопічні тріщини і відсутній інкубаційний період, ділить діапазон $\sigma_{-1} - \sigma_b$ на дві області - малоциклової і багатоциклової утомленості.

Для скорочення трудомісткості випробувань на утомленість розроблено багато прямих і непрямих прискорених методів. Найпоширенішим є метод ступінчастого навантаження, який ґрунтується на гіпотезі про лінійний характер накопичення утомних пошкоджень. У даному випадку на кожному рівні періодично підвищуваної на $\Delta\sigma$ амплітуди напруг здійснюється n_i циклів навантаження. Випробування триває до руйнування зразка. Отримані результати дозволяють визначити шукану межу витривалості [14].

У непрямих методах використовується зв'язок межі витривалості з іншими характеристиками механічних властивостей матеріалів або різка зміна деяких параметрів, досягши межі витривалості. У першому наближенні значення σ_{-1} можна визначити за формулою $\sigma_{-1} = 5 + 0,25(\sigma_b + \sigma_i)$. Інший непрямий метод полягає у вимірюванні температури зразка, який випробовується при безперервному зростанні амплітуди напруг. Досягнувши напруги, що дорівнює межі витривалості, порушується лінійна залежність між амплітудою напруг і температурою.

Проте непрямі методи не можуть виявити вплив на межу витривалості шорсткості поверхні зразка або корозії. Прямі ж методи показали, що межа витривалості полірованого зразка на 27% більша, ніж у точеного. При корозії межа витривалості може знизитися у 4-6 разів [15].

3.4.4 Вимірювання твердості

Вимірювання твердості належить до найпоширеніших видів механічних випробувань у матеріалознавстві. Це обумовлено відносною простотою методів вимірювання і можливістю за твердістю приблизно оцінити характеристики інших механічних властивостей матеріалу. Методи вимірювання твердості ґрунтуються на тому, що у випробовуваний матеріал вдавлюють індентор, а пластичну деформацію при цьому розглядають як міру твердості. Найпоширенішими інденторами є: загартована кулька, алмазний конус і чотиригранна алмазна піраміда з кутом при вершині 136° (рис. 3.20).

При визначенні твердості за Брінеллем кульку протягом встановленого часу вдавлюють з певною силою у випробовуваний зразок. У результаті на його поверхні утворюється відбиток у вигляді частини сфери діаметром d і глибиною h . Число твердості HB розраховують як відношення прикладеного навантаження до площі відбитка. Для визначення останнього за допомогою спеціальної лупи заміряється діаметр відбитка. Число твердості за Брінеллем

$$HB = \frac{0,204F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (3.6)$$

де F - прикладене навантаження, Н; D - діаметр кульки, мм.

Діаметр кульки і навантаження вибираються залежно від механічних властивостей випробовуваного матеріалу і товщини зразка. Число твердості за Брінеллем може визначатися і за спеціальними таблицями.

Твердість за Віккерсом HV визначають аналогічно. Відмінність полягає лише у твердості і формі індентора. Для визначення площі відбитка вимірюють за допомогою мікроскопа його діагональ d . При вказаному вище куті пірамі-

ди число твердості за Віккерсом розраховується за формулою $HV=0,189F/d^2$ [3].

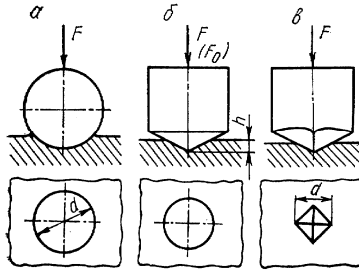


Рисунок 3.20 – Індентори, вживані при вимірюванні твердості: а - кулька; б – конус; в – піраміда

Визначення твердості за методом Роквелла є найпоширенішим видом технологічного контролю металевих деталей. У порівнянні з методом Брінелля у нього такі переваги: простота визначення числа твердості шляхом відліку за шкалою індикатора без обчислення або користування таблицями; мала ушкодженість поверхні; висока продуктивність при вимірюваннях. До недоліків методу можна віднести відсутність єдиної шкали і довільність її вибору.

Твердість за Роквеллом HR , що виражається в умовних одиницях, обчислюють як лінійну функцію різниці глибин, на які вдавлюється конічний індентор під дією двох навантажень, що послідовно прикладаються, – попереднього F_0 і загального F , що дорівнює сумі попереднього і основного F_1 навантажень:

$$HR = A - (h - h_0) / c, \quad (3.7)$$

де A - деяка постійна, яка вибирається залежно від вживаної шкали; h_0 - глибина вдавлювання при дії попереднього навантаження; h - глибина вдавлювання при дії загального навантаження, виміряна після зняття основного; C - ціна поділу шкали вимірювального пристрою в умовних оди-

ницях твердості ($C = 0,002$ мм); для шкал А і С беруть $A = 100$, а для шкали В $B = 130$ мкм.

Навантаження при вимірюванні за методом Роквелла чітко регламентовані: попереднє - 98 Н, загальне - 589, 981 і 1471 Н.

Для визначення твердості щодо м'яких матеріалів за Роквеллом замість алмазного конуса використовується сталева загартована кулька діаметром 1,588 мм. Найчастіше на практиці застосовується шкала С. Шкала А застосовується для дуже твердих матеріалів, наприклад твердих сплавів, а шкала В — при використанні сферичного індентора. Число твердості за Роквеллом позначається через HR з додаванням позначення відповідної шкали: HRA, HRC, HRB [3].

3.4.5 Випробування на зносостійкість

Метою випробування на зносостійкість є вивчення поведінки контактних поверхонь двох деталей 1 і 2, що знаходяться у відносному русі і притиснуті одна до одної з певною силою (рис. 3.21). Між цими деталями, як правило, знаходиться проміжний шар з речовин, які можуть уповільнити або, навпаки, прискорити спрацювання. Випробування можна проводити на моделі або аналізуючи спрацювання елементів реальної промислової установки.

Випробування на моделі, як правило, швидкісні, проводять у жорсткіших, ніж на практиці, умовах. Хоча до результатів випробувань на моделі слід відноситися з обережністю, останні дуже поширені.

Однією з основних причин зношування деталей машин і різальних інструментів є утомленість матеріалу у поверхневих шарах при пружній деформації і окрихчування при повторній пластичній деформації. За наявності у структурі

матеріалів твердих частинок (наприклад, карбідів заліза, хрому і т. д.) , що труться, можливе мікрорізання цими

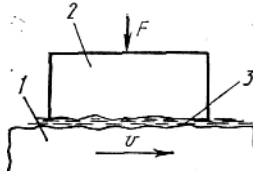


Рисунок 3.21 - Схема випробування на зносостійкість

частинками, тобто абразивний знос. Воно може мати місце також за наявності абразивних частинок у проміжному шарі. При значному питомому навантаженні і щодо малої швидкості різання часто спостерігається адгезійний знос. При достатньо високій температурі поверхонь тертя розвивається знос, пов'язаний з дифузією атомів одного з тіл в інше. При цьому можуть змінюватися хімічний склад і структура, а отже, і механічні властивості поверхневих шарів, що сприяє збільшенню швидкості інших видів зношування. У деяких випадках зношування може бути пов'язане з окисленням поверхонь, що труться, ерозією і т.д.

На рис. 3.22 показані різні схеми випробувань на зносостійкість методом моделювання, які проводяться на різних лабораторних установках. Випробовуваний зразок 1 із заданою силою F притискається до периферії ролика 2 або торця диска 3.

Наведені схеми випробувань забезпечують різний коефіцієнт взаємного перекриття (відношення площ тертя контактуючої пари): від близького до нуля (рис. 3.22 а) до 1 (рис. 3.22 б).

Для оцінки в лабораторії зносостійкості пари тертя стосовно заданих експлуатаційних умов необхідно:

1) забезпечити коефіцієнт взаємного перекриття, який має місце при експлуатації;

- 2) забезпечити швидкість ковзання, що максимально наближається до експлуатаційної;
- 3) підібрати таке навантаження, при якому контактна температура відповідатиме експлуатаційній;
- 4) визначити фактичну площу дотику;
- 5) обчислити питомий знос.

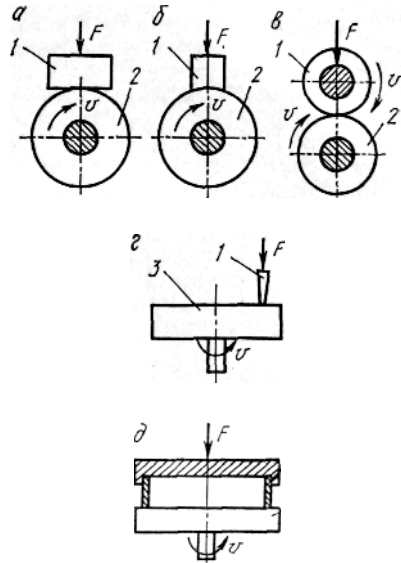


Рисунок 3.22 - Схеми випробувань на зносостійкість методом моделювання

Питомий знос збігатиметься з експлуатаційним при однакових параметрах шорсткості поверхонь в реальному вузлі і у випробовуваних зразках.

Для визначення зносу матеріалу і його розподілу по поверхні тертя застосовують різні методи. Найпоширенішим є метод вимірювання лінійного зносу, для чого вимірюють розміри елементів пари тертя до і після випробування.

Для вимірювання розмірів користуються мікрометром, контактними або безконтактними електричними або пневматичними приладами.

Часто застосовується також ваговий метод вимірювання зносу, при якому зразки зважуються до і після випробування. Проте цей метод не дає можливості визначити закон розподілу зносу по поверхні тертя. У разі нерівномірного зносу зразків його вимірювання зручно проводити за допомогою профілографа.

Для вимірювання зносу елементів пар тертя в діючій машині добре себе зарекомендував метод штучних баз. В основі цього методу лежить непряме визначення зносу за зміною розмірів поглиблення наперед відомого профілю, що звужується (рис. 3.23). Таке поглиблення можна одержати вдавлюванням конічного або пірамідального індентора (рис.3.23 а), вирізуванням гострокутної лунки різцем, що обертається, або шліфувальним кругом (рис.3.23 б).

Лінійний знос Δ_B визначається за такими формулами. Якщо розмір діагоналі пірамідальної лунки змінився від d_1 до d_2 , то

$$\Delta_B = \frac{d_1 - d_2}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (3.8)$$

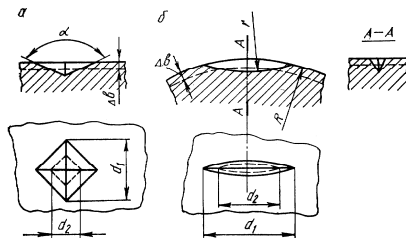


Рисунок 3.23 - Схеми штучних баз для вимірювання зносу

Якщо довжина лунки радіуса r в результаті зносу зовнішньої циліндричної поверхні змінилася від d_1 до d_2 , то

$$\Delta b = 0,125(d_1^2 - d_2^2)(1/r - 1/2), \quad (3.9)$$

а у разі вимірювання зносу внутрішньої циліндричної поверхні

$$\Delta b = 0,125(d_1^2 - d_2^2)(1/r - 1/2). \quad (3.10)$$

Для плоскої поверхні

$$\Delta b = 0,125(d_1^2 - d_2^2)/r. \quad (3.11)$$

Об'єм продуктів зношування можна також визначити шляхом хімічного аналізу змащувального матеріалу. Цей метод має високу точність, але не дає можливості оцінити знос кожної з деталей, що труться. Якщо в матеріал деталі, знос якої вимагається визначити, внести радіоактивні ізотопи, то у міру зношування в шар змащувального матеріалу потраплятиме пропорційна зносу кількість атомів цього ізотопу. За інтенсивністю випромінювання ізотопу в пробі масла можна робити висновок про об'ємний знос за певний час. Ізотопи найчастіше утворюються у поверхневому шарі випробовуваної деталі опромінюванням її потоком нейтронів [3].

3.4.6 Неруйнуючі методи визначення механічних властивостей і структури

Дані методи ґрунтуються на кореляційній залежності між структурою і механічними властивостями матеріалів, з одного боку, та їх магнітними й акустичними характеристиками, з іншого. Такий, наприклад, зв'язок між твердістю вуглецевих і низьколегованих сталей та їх коерцитивною силою a_c . Чим більший вміст вуглецю у сплаві, тим вища коерцитивна сила. Але в різних структурних складових вуглець різною мірою сприяє збільшенню коерцитивної сили сплаву: меншою мірою, коли він знаходиться у формі графіту, сильніше - в перліті і мартенситі і найбільш сильно — у цементиті. Залежність між коерцитивною силою і твердістю сталей 30X13 і 20X17H2 показана на рис. 3.24, а

залежність коерцитивної сили і твердості сталі ШХ15 від температури відпустки - на рис. 3.25 [9].

При перемагнічуванні феромагнітних тіл магнітна індукція B залежить не тільки від напруженості магнітного поля σ , але й від попереднього магнітного стану. Вид кривої циклу перемагнічування, так званою петлею гістерезису, показаний на рис. 3.26, де відрізок O_d характеризує залишковий магнетизм, тобто магнітну індукцію при $a = 0$, O_c – коерцитивну силу σ_c , тобто напруженість магнітного поля, необхідну для повного розмагнічування.

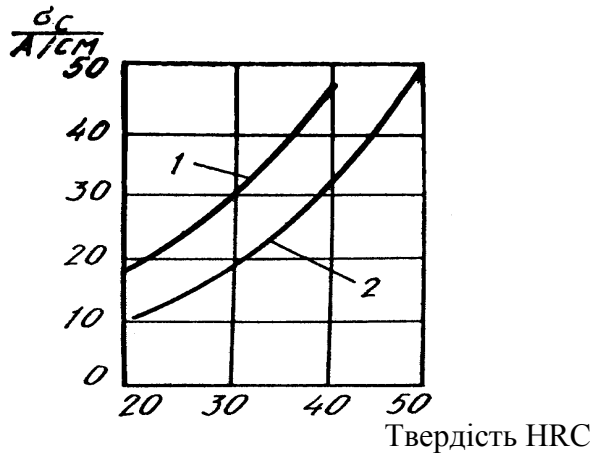


Рисунок 3.24 - Залежність між коерцитивною силою і твердістю: 1 - сталь 30X13; 2 - сталь 20X17H2

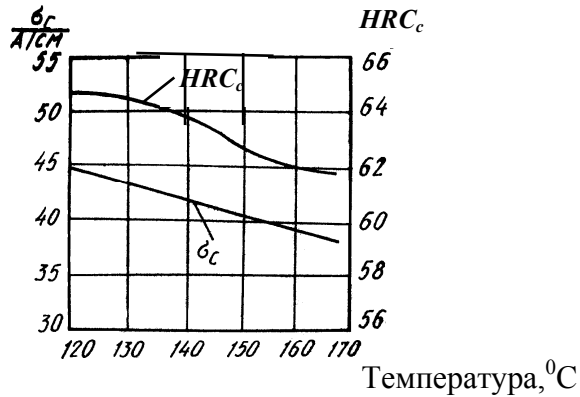


Рисунок 3.25 - Залежність коерцитивної сили і твердості від температури відпуску сталі 3Х15

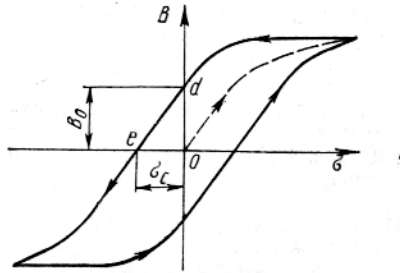


Рисунок 3.26 - Крива перемагнічування

Блок-схема коерцитиметра показана на рис. 3.27. Ділянка контрольованого об'єкта 1 намагнічується за допомогою електромагніта 2 і котушок 8. Перемичкою електромагніта служить осердя 7 ферозонда з живильною 5 і вимірювальними 4 котушками. Котушки 8 одержують живлення від силового трансформатора 11 через стабілізувальні випрямлячі намагнічування 10 і розмагнічування 12 і потім через комутатор 14. Індикатори 9 до 13 показують відпові-

дно струм намагнічування і розмагнічування. Котушка 5 одержує живлення через блок 6, а напруга на виході вимірювальної котушки вимірюється приладом 3.

Після намагнічення за допомогою комутатора відключається струм намагнічення і плавно збільшується струм розмагнічування до того часу, поки прилад 3 не покаже відсутність магнітного потоку на контрольованій ділянці. Показання індикатора 13 у цей момент пропорційні вимірюваній коерцитивній силі. Прилад забезпечує точність вимірювання $\pm 3\%$.

У інших приладах вимірюється не коерцитивна сила, а пропорційна їй залишкова індукція B (див. рис. 3.27) або магнітна проникність, що дорівнює згідно з визначенням відношенню B/σ . Індукційний метод вимірювання магнітної (динамічної) проникності ґрунтується на тому, що якщо підтри-

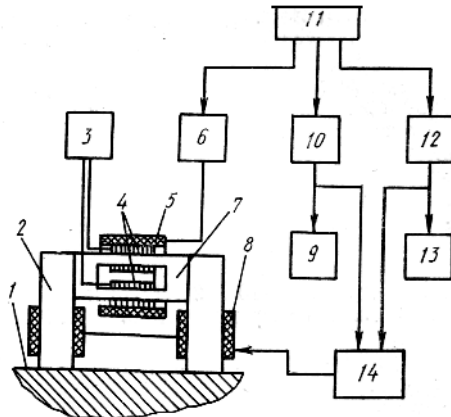


Рисунок 3.27 - Блок-схема коерцитиметра

мувати постійною амплітуду напруженості поля, яка намагнічує, то амплітудна або динамічна проникність буде пропорційна амплітуді індукції в контрольованій деталі. Як правило, використовують диференціальну схему, за допомогою якої визначають зміну магнітної проникності ко-

нтрольованої деталі порівняно з еталонною. Похибка вимірювання приладом ЕМТ-2, побудованому на даному принципі, не перевищує НРС для сталей 50ХФА і 30ХГСА [9,15].

Електромагнітний метод (метод вихрових струмів) базується на реєстрації змін електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться збудливою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Його можна застосовувати для вимірювання параметрів механічних властивостей матеріалу, якщо існує кореляційна залежність між ними і питомим електричним опором або магнітною проникністю випробовуваного матеріалу.

Експериментально встановлено, що питома електрична проникність сталі тим менше, чим вищий в ній вміст вуглецю і чим більше вуглецю при гартуванні перейде у твердий розчин. Виявлений зв'язок між питомою провідністю алюмінієвих сплавів Y і властивостями їх після термічної обробки. Так, наприклад, якщо у стані поставки сплав АК6 має в середньому $Y = 27,4$ МСм/м, то при нормальному гартуванні $Y = 22,1$ МСм/м. Якщо при гартуванні матеріал перегрітий, то $Y = 21,1$ МСм/м. Залежно від часу старіння значення Y змінюється в межах від 20 до 24 МСм/м, спочатку зменшуючись, а потім збільшуючись.

Електромагнітними структуроскопами вимірюють миттєве значення несинусоїдальної напруги вимірювального вихрострумовеого перетворювача ВТП або амплітуду і фазу однієї з його гармонік при перемагнічуванні у високочастотних полях малої напруженості, в низькочастотних полях великої напруженості, або у дво- і багаточастотних полях. Це дозволяє контролювати варіації хімічного складу, структуру металів і сплавів, а також механічні напруги в них. За допомогою електромагнітних приладів з ВТП можна контролювати якість термічної і хіміко-термічної обробки, стан поверхневих шарів деталей після механічної обробки (шліфування, наклеп), знаходити утомні тріщини

на ранніх стадіях розвитку, наявність α -фази і т.д. Таким чином, вимірний електромагнітним структуроскопом сигнал несе інформацію про багато параметрів, що є, з одного боку, перевагою, а з іншого - недоліком, оскільки потрібні спеціальні прийоми розділення інформації про окремі параметри об'єкта.

За видом перетворення параметрів об'єкта у вихідну величину ВТП поділяють на трансформаторні і параметричні. У трансформаторних ВТП, що мають, як мінімум, дві обмотки (збудливу і вимірювальну), параметри об'єкта перетворюються в напругу вимірювальної обмотки, а в параметричних, що мають, як правило, одну обмотку, - у комплексний опір. Схеми деяких перетворювачів показані на рис. 3.28 [9, 15].

Акустичні методи контролю фізико-механічних властивостей матеріалів (розмірів зерна, модулів пружності, твердості, текстури, міцності та ін.) базуються на зв'язку цих властивостей із швидкістю поширення і коефіцієнтом згасання звукових хвиль у випробовуваному матеріалі.

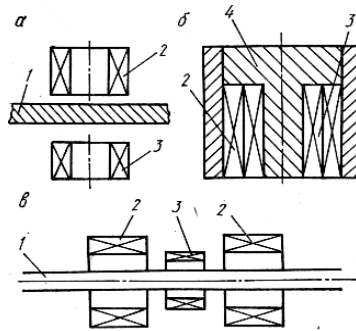


Рисунок 3.28 - Схеми вихрострумових вимірювальних перетворювачів: а - накладного; б - накладного екранного;

в - проходного вихрострумового;

1 - випробовуваний зразок; 2 - збудлива обмотка;

3 - вимірювальна обмотка;

4 - осердя

Одним з найважливіших показників якості кристалічних матеріалів, зокрема металів, є розмір зерна, що визначає міцність характеристики виробу. У першому наближенні залежність між номером шкали (у балах) N і розмірною характеристикою зерна \bar{D} (мкм) можна апроксимувати рівнянням $\bar{D} = 352 \exp(-0,35N)$.

Найбільший вплив розміру зерна на коефіцієнт загасання ультразвуку спостерігається при $5 < \lambda/D < 15$ (λ - довжина ультразвукових хвиль). Для вимірювання загасання найчастіше застосовується імпульсний метод, що ґрунтується на порівнянні амплітуд двох або декількох ультразвукових сигналів різної частоти. При цьому опорну частоту вибирають низькою, так що згасання ультразвукових хвиль при ній практично не залежить від структури матеріалу. Робочі частоти відповідають наведеній вище нерівності. При робочій частоті 0,65-10 МГц можна оцінити розмір зерна від 1 до 7 балів. Для вимірювання розміру зерна можна застосовувати серійні імпульсні дефектоскопи (ДСК-1, УС-11 І, УС-10П і т. д.).

Вимірюючи швидкість поширення ультразвукових хвиль у матеріалі, можна визначити його модуль пружності та інші пружні сталі. Крім того, за відносною зміною швидкості різних ультразвукових хвиль можна визначити напружений стан матеріалу. На експериментальній установці УЗМД контролюють залишкові поверхневі напруги у сталевих або чавунних виливках з точністю $\pm 0,2$ МПа [9, 15].

Межу міцності склопластиків можна визначити за формулою $\sigma_B = E[A + B/ac]$,
де A і B - коефіцієнти; a - коефіцієнт згасання;
 c - швидкість поширення ультразвукових хвиль у матеріалі; E — модуль пружності склопластику, який визначають за одержаними значеннями c і густиною матеріалу.

Випромінюючий 2 і приймальний 1 шукачі встановлюють на очищену і змазану маслом поверхню склопластику 3 (рис. 3.29). Відстань між шукачами l_0 , як правило, становить 200 мм. Швидкість поширення звуку визначають за часом t його проходження в матеріалі $c = l_0/t$. Для вимірювання коефіцієнта згасання один із шукачів встановлюють на відстані $l_1 = l_0/2$. За зміною амплітуди сигналу знаходять значення a .

Для вимірювання твердості абразивного інструменту використовують кореляційний зв'язок її із швидкістю поширення ультразвукових хвиль у матеріалі, яку визначають резонансним методом за допомогою приладу «Звук-1М» (рис.3.30) [16]. Генератор 1 створює електричні

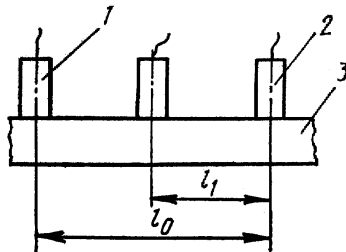


Рисунок 3.29 - Схема вимірювання механічних властивостей матеріалів акустичним методом

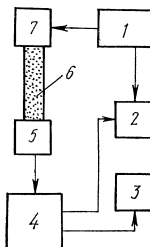


Рисунок 3.30 - Блок-схема приладу «Звук-1М»

коливання, частота яких змінюється у межах від 5 до 550 кГц. За допомогою п'єзоелектричного випромінювача 7 ці коливання перетворюються у механічні, передаються зразку 6 і сприймаються п'єзоелектричним приймачем 5, який здійснює зворотне перетворення. Електричні коливання з приймача проходять через підсилювач 4 і надходять на амплітудний 3 і фазовий 2 індикатори резонансу. Одночасно на фазовий індикатор подається опорна напруга з генератора. При збігу частоти генератора з частотою власних коливань зразка настає резонанс, який фіксується у момент розкриття сектора очка амплітудного індикатора або (більш точно) за мінімальними показаннями стрілкового приладу фазового індикатора. Градуовальні таблиці дозволяють оцінювати твердість абразивного інструменту за замірною резонансною частотою залежно від розмірів інструменту [16].

3.4.7 Методи визначення залишкових напруг

Залишкові напруги можна класифікувати за протяжністю силового поля:

1) макронапруги, або напруги 1-го роду, що охоплюють області, сумірні з розмірами випробовуваного об'єкта; вони мають орієнтацію, залежну від форми об'єкта;

2) мікронапруги, або напруги 2-го роду, що поширюються на окремі зерна металу або на групу зерен;

3) субмікроскопічні напруги, що належать до спотворень атомних ґрат кристала; орієнтація їх пов'язана із структурою атомних ґрат.

Залишкові макронапруги виникають в результаті дії різних технологічних факторів при виготовленні деталі (вироби). Значення і знак залишкових макронапруг залежать від схеми деформації об'єкта і температури, при якій вона відбувалася. При обробці різанням або шліфуванням залишкові макронапруги є наслідком нерівномірності розпо-

ділу температури і деформацій у поверхневих шарах обробленої деталі і в часі. На рис. 3.31 криві 4, 2 і 1 відповідають операціям шліфування, точіння і поєднанню шліфування з алмазним вигладжуванням сталі ЕІ643, а 5 і 3 - шліфуванню і фрезеруванню сталі ХН70ВМТЮ. Склад і спосіб підведення змащувально-охолодних рідин значно впливає на значення і знак макронапруг після обробки різанням.

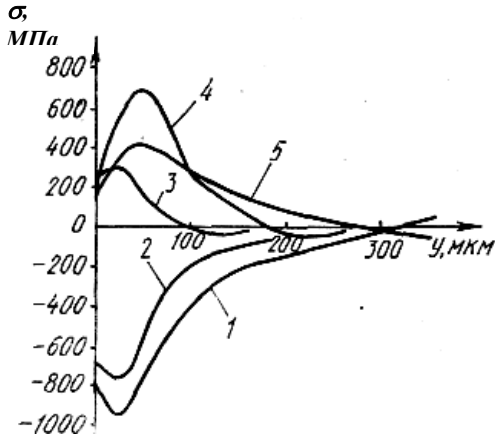


Рисунок 3.31 - Епюри розподілу макронапруг по глибині біля поверхневого шару деталей після обробки їх різними методами

Значні макронапруги виникають при термічній обробці (гартуванні), при зварюванні і різанні. У цих випадках залишкові макронапруги обумовлені в основному нерівномірністю температурного поля при швидкому нагріванні або охолодженні. На рис. 3.32 показана епюра напруг в суцільному зразку із сталі 40ХНМ при гартуванні у воді (1) і маслі (2) [17].

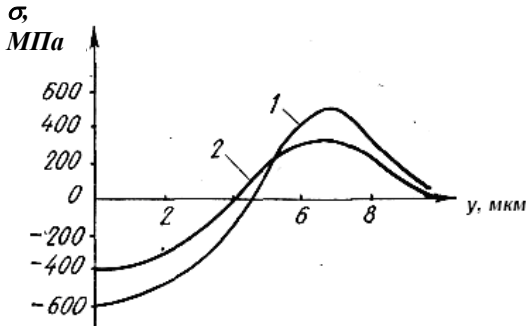


Рисунок 3.32 - Епюри макронапруг після гарту

Мікронапруги є наслідком відмінності фізичних властивостей компонентів полікристалічного тіла, обмежених умов деформації окремих зерен, а також анізотропії їх властивостей. Особливо значні мікронапруги при фазових перетвореннях (кристалізація і розпад твердого розчину), оскільки при цьому збільшення або зменшення об'єму окремих зерен супроводжується появою значних міжзеренних напруг. Внаслідок відмінності коефіцієнтів лінійного розширення компонентів сплаву при його нагріванні також виникають значні мікронапруги.

Виниклі у матеріалі залишкові мікро- і макронапруги не залишаються постійними, а змінюються з часом. Релаксація макронапруг супроводжується звичайно загальною деформацією деталі, іноді настільки значної, що вона спостерігається візуально або спричиняє руйнування (поява тріщини). При низьких температурах цей процес відбувається повільно. Нагріваючи до температури відпуску і вище, сприяє прискоренню релаксації макронапруг.

Основними методами визначення залишкових напруг є механічні і рентгенівські. Застосовуються також електрофізичні методи, при яких залишкові напруги знаходять за зміною електромагнітних властивостей матеріалу поверхневого шару деталі.

Механічні методи ґрунтуються на припущенні, що розрізання або видалення частини деталі із залишковими напругами еквівалентні додатку до деталі, що залишилася, на поверхнях напруг, що дорівнюють залишковим, які знову з'явилися, але із зворотним знаком. Вони спричиняють деформацію деталі або появу зусилля у пристроях, що перешкоджають деформації. Вимірюючи виниклі деформації або сили, можна обчислити залишкові напруги.

Відмінності механічних методів полягають:

- а) у формі зразків;
- б) у припущеннях щодо закону розподілу залишкових напруг;
- в) у способі вимірювання деформацій зразка або реакцій опор, здатних усунути ці деформації.

Найчастіше застосовуються для вирізки зразків методи електроерозійного прощиття. Для деталей з жароміцних і титанових сплавів дуже перспективні методи електрохімічного прощиття. Вони продуктивні і не викликають додаткових залишкових напруг. Після механічної вирізки зразків рекомендується збуджувати із знову новоутворених поверхонь шар завтовшки до 0,2 мм для видалення напруг, що виникають при вирізці.

Найпоширенішими методами видалення напружених шарів металу при дослідженні залишкових напруг є ті, що електролітичні і хімічні трують. Рекомендовані склади протравлювачів і електролітів для різних матеріалів наведені у табл. 3.5. Електрохімічним травленням за інших рівних умов переважно, змінюючи густину струму, можна змінювати швидкість зняття металу, а також забезпечувати її стабільність, що важливо для автоматизації запису кривої деформації зразка. Поверхні зразка, які не підлягають травленню, і деталі підвіски захищаються покриттями, стійкими при даній температурі. При температурах до 30 °С можна використовувати парафін і віск. Лаки ХВЛ-21 і Е1 можна використовувати і при вищих температурах. Травлення складами, наведеними у табл. 3.5, проводиться при температурі 20 °С [16].

Таблиця 3.5 – Розчини для травлення [16]

Матеріал зразка	Склад електроліту або протравлювача (у масових частках)	Метод травлення
Вуглецеві і низьколеговані сталі	18-20% сірчаної кислоти, інше – вода 20% азотної кислоти, інше - вода	Електрохімічний
Високолеговані сталі	45% ортофосфорної кислоти, 45% сірчаної кислоти, інше – вода 60-65% ортофосфорної кислоти, 15-20% сірчаної кислоти, 0,5% хромового ангідриду, 7% гліцерину, 0,5% сірчаноокислого заліза, інше – вода 15-20% азотної кислоти, 20-25% лугу натрію, інше – вода 30% азотної кислоти, інше – вода	Електрохімічний
Чавуни	35% бісульфату натрію, інше – вода 8-10% соляної кислоти, інше – вода	Хімічний
Сплави алюмінію	10-15% натрієвого лугу, інше – вода 91% ортофосфорної кислоти, 9% хромового ангідриду	Електрохімічний, хімічний
Латунь, бронза	100% ортофосфорної кислоти	Електрохімічний

Форма вирізуваних зразків показана на рис. 3.33. Напружений стан в них вважається одноосовим. Напруги змінюються тільки залежно від відстані h від даної точки A до обробленої поверхні C . Зразки у вигляді стрижнів прямокутного перетину (рис. 3.33 а) широко використовуються для дослідження впливу різних технологічних факторів, зокрема методів поверхневої обробки, на розподіл залишкових напруг. Крім того, прямокутні призматичні зразки вирізуються з циліндричних деталей для визначення нор-

мальних залишкових напруг у поверхневому шарі деталі уздовж твірних. При цьому рекомендується дотримувати співвідношення

$$0,3\sqrt{HR} < B < 0,4\sqrt{HR}, \quad (3.12)$$

де H - висота зразка; R - зовнішній радіус циліндричної поверхні.

Проте не рекомендується приймати ширину B зразків більше 15 мм. Їх висота H повинна більш ніж у три рази перевершувати максимальну глибину досліджуваного поверхневого шару. Із збільшенням висоти зразка знижуються похибки, пов'язані з внесенням додаткових

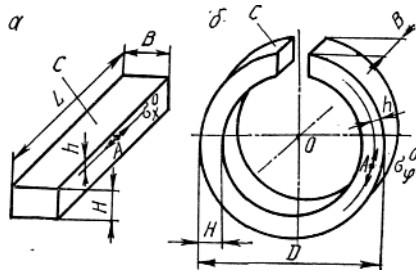


Рисунок 3.33 - Форма зразків для визначення епюри макронапруг

залишкових напруг при вирізанні. Разом з тим збільшення висоти зразка обмежується необхідністю отримання досить великих прогинань при даній довжині у процесі травлення. Щоб збільшити допустиму товщину зразків, рекомендується застосовувати метрологічні схеми вимірювання деформацій з великими коефіцієнтами посилення K_u (рис. 3.34, 3.35) [16].

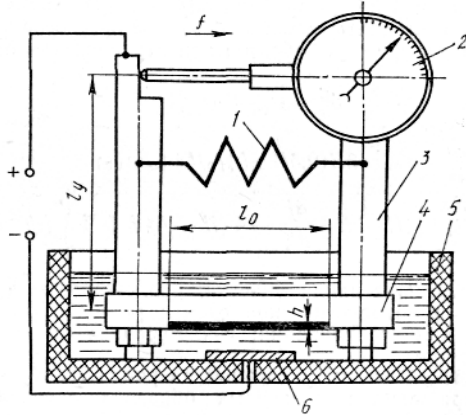


Рисунок 3.34 - Метрологічна схема визначення макронапруг у призматичному зразку:

- 1 - пружина для компенсації вимірювального зусилля;
- 2 - індикатор; 3 - стрижні підсилювача;
- 4 - зразок; 5 - ванна з кислототривкого матеріалу;
- 6 - пластина для подачі напруги

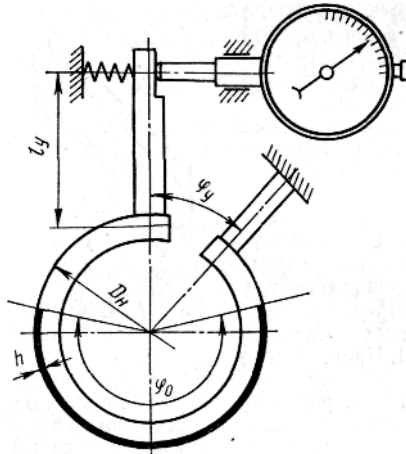


Рисунок 3.35 - Метрологічна схема визначення макронапруг у кільцевому зразку

Для визначення колових залишкових напруг у циліндричних деталях вирізують кільцеві зразки (див. рис.3.33 б), що задовольняють нерівність $H < 0,21D$.

Залишкові напруги σ_x^o у точці А, віддаленій від поверхні призматичного зразка на відстані h , представляють у вигляді суми двох складових: $\sigma_{xв}$, визначуваної за деформацією зразка при вирізці з деталі або після зняття окремо оброблюваного зразка з пристосування, і σ_{xc} , обчислюваної по кривій деформації зразка при стравлюванні його на глибину h [16]:

$$\sigma_x^o = \sigma_{xв} + \sigma_{xc}, \quad (3.13)$$

де

$$\sigma_{xв} = 8E(0,5H - h)f_o / L^2 + E\varepsilon_{xв},$$

$$\sigma_{xc} = \frac{4F}{3\ell_o^2 K_y} \left[(H - h)^2 - \frac{df}{dh} - 4(H - h)f + 2 \int_0^h (h)dh \right], \quad (3.14)$$

E - модуль пружності; l_0 - довжина ділянки, що підлягає травленню; K_y - коефіцієнт посилення метрологічної схеми; f_B - деформація при вирізці; f - деформація при травленні; $\varepsilon_{xв}$ - середнє відносне подовження зразка при вирізці. Для метрологічної схеми, наведеної на рис. 3.34, $K_y = 8/\ell_0$.

Наявність залишкових напруг в полікристалічних тілах, якими є метали, обумовлюються різними інтерференційними ефектами рентгенівського проміння, відображеного від поверхні зразків, залежно від розмірів зони, в якій ці напруги врівноважуються. Макронапруги мають постійну орієнтацію на досліджуваній ділянці поверхні, і внаслідок цього змінюються міжатомні відстані, що спричиняє кутове відхилення проміння, відображеного від поверхні (від певних кристалографічних площин у поверхневому шарі). Внаслідок цього з'являється зсув ліній на рентгенограмах, за яким і обчислюються залишкові напруги 1-го

роду. У віддзеркаленні беруть участь тільки певним чином орієнтовані кристали поверхневого шару товщиною від 3 до 50 мкм. Одержаний при цьому зсув пропорційний усередненому значенню залишкових напруг, розподілених за певним законом у цьому шарі.

Мікронапруги, що врівноважуються в об'ємах окремих кристалів і блоків, не можна визначити механічними методами. Але вони легко визначаються за розширенням інтерференційних ліній на рентгенограмі.

Описані раніше електромагнітні методи контролю структури можна застосовувати і для вимірювання залишкових напруг. Але точність цих методів поки відносно низька, і для визначення епюри залишкових напруг, так само, як і при механічних методах, потрібне послідовне збудження шарів металу [16].

4 МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1 Основні визначення

Планування експерименту – це процедура вибору числа і умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. При цьому важливе таке:

- прагнення до мінімізації загальної кількості дослідів;
- одночасне варіювання всіма змінними, що визначають процес, за спеціальними правилами – алгоритмами;
- використання математичного апарату, що формалізує багато дій експериментатора;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє ухвалювати обґрунтоване рішення після кожної серії експериментів.

Планування експерименту застосовується при пошуку оптимальних умов, інтерполяційних формул, виборі істотних чинників, оцінці і уточненні констант теоретичних моделей, виборі найсприятливіших з деякої множини гіпотез про механізм явищ, дослідження діаграм склад – властивість і т.д.

Для проведення експерименту перш за все необхідно визначитися з «об'єктом дослідження». Для опису об'єкта дослідження користуються схемою (рис.4.1) [17]. Дію на «чорний ящик» стрілками зліва позначаємо буквою X і називаємо **факторами**. Стрілки справа зображають чисельні характеристики цілей дослідження, позначаємо їх буквою Y і називаємо **параметрами оптимізації**. Кожен фактор може набувати в досліді одне з декількох значень. Такі значення називаються **рівнями**.

При розв'язанні задачі дослідження використовується **математична модель**.

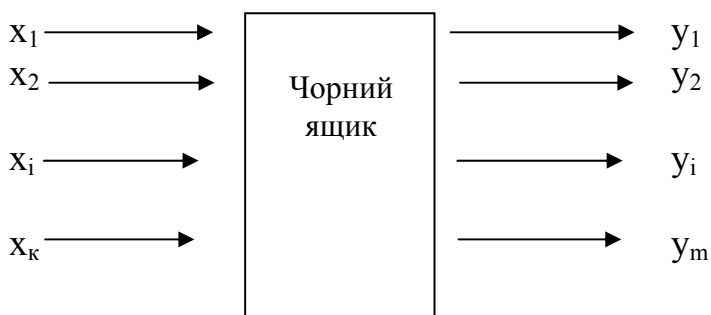


Рисунок 4.1 – Схема «чорного ящика»

Математична модель є рівнянням, що зв'язує параметр оптимізації з факторами. Це рівняння в загальному вигляді записується так:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (4.1)$$

Така функція є функцією відгуку.

Планування експерименту припускає активне втручання у процес і можливість вибору в кожному досліді тих рівнів чинників, які становлять інтерес. Тому такий експеримент називається **активним**. Об'єкт, на якому можливий активний експеримент, називається **керованим**.

Планування **екстремального експерименту** – це метод вибору кількості і умов проведення дослідів, мінімально необхідних для пошуку оптимальних умов, тобто для вирішення поставленого завдання.

При плануванні екстремального експерименту дуже важливо визначити параметр, який потрібно оптимізувати. Мета дослідження повинна бути сформульована дуже чітко і допускати кількісну оцінку.

4.2 Параметр оптимізації

Параметр оптимізації – це характеристика мети, задана кількісно. Параметр оптимізації є **реакцією** (відгу-

ком) на дію факторів, які визначають поведінку вибраної системи. Вибір параметра оптимізації при плануванні екстремального експерименту, як правило, складний. Для цього іноді потрібен одночасний облік декількох параметрів. Якщо вибраний один параметр оптимізації, то можливий рух до оптимуму. У цьому випадку інші характеристики вже не виступатимуть як параметри оптимізації, а служитимуть обмеженнями.

Параметр оптимізації повинен бути кількісним, задаватися числом. Його необхідно вміти вимірювати при будь-якій можливій комбінації вибраних рівнів факторів. **Безліч значень, яких може набувати параметр оптимізації, називається областю його визначення.** Області визначення можуть бути безперервними і дискретними, обмеженими і необмеженими. Наприклад, вихід реакції – це параметр оптимізації з безперервною обмеженою областю визначення. Він може змінюватися в інтервалі від 0 до 100%. Число бракованих виробів, число зерен на шліфі сплаву, число кров'яних тілець у пробі крові – це параметри з дискретною областю визначення, обмеженою знизу.

Вміти вимірювати параметр оптимізації – це означає мати у своєму розпорядженні відповідний прилад. Якщо немає способу кількісного вимірювання результату, то використовується прийом ранжирування (ранговий підхід). При цьому параметрам оптимізації привласнюються оцінки – ранги за задалегідь виробленою шкалою: двобальної, трибальної, п'ятибальної і т.д. Ранговий параметр має дискретну обмежену область визначення.

Параметр оптимізації повинен виражатися одним числом і бути однозначним у статичному значенні. Заданому набору значень факторів повинне відповідати одне з точністю до помилки експерименту значення параметра оптимізації.

Для успішного досягнення мети дослідження необхідно, щоб параметр оптимізації дійсно оцінював ефектив-

ність функціонування системи заздалегідь вибраному значенні.

Параметр оптимізації повинен відповідати вимогам універсальності або повноти. Бажано, щоб він мав фізичний сенс, був простим і легко обчислюваним. При виборі параметра оптимізації потрібно мати на увазі, що він деякою мірою впливає на вигляд математичної моделі досліджуваного об'єкта.

4.3 Фактори

Після того як вибрані об'єкт дослідження і параметр оптимізації, потрібно включити в розгляд всі існуючі фактори, які можуть впливати на процес.

Кожен фактор може набувати в досліді одне з декількох значень. Такі значення називаються **рівнями**. Тому кожний фактор має певне число дискретних рівнів. Фіксований набір рівнів факторів визначає один з можливих станів «чорного ящика». Це і є умови проведення одного з можливих дослідів. Якщо перебрати всі можливі набори станів, то ми отримаємо повну безліч різних станів даного «ящика». Це і буде число можливих різних дослідів. Число різних станів визначається шляхом піднесення числа рівнів p до степеня числа факторів k : p^k . **Фактором** називається вимірювана змінна величина, що набуває в деякий момент часу певного значення.

Фактори відповідають способам дії на об'єкт дослідження. Фактор вважається заданим, якщо разом з його назвою вказана **область його визначення**. Під областю визначення розуміють сукупність усіх значень, яких, у принципі, може набувати даний фактор. Сукупність значень чинника є підмножиною з безлічі значень, що створюють область визначення. Область визначення може бути безперервною і дискретною. У матеріалознавчих задачах планування експерименту використовуватимемо дискретні

області визначення. У практичних задачах області визначення факторів обмежені. Обмеження можуть мати принципний або технічний характер. Чинники (фактори) поділяються на кількісні і якісні. У ряді випадків межа між поняттям якісного і кількісного фактора дуже умовна.

Час технологічного процесу, температура, концентрація реагуючих речовин, швидкість подачі речовин, величина рН – це приклади кількісних факторів, що найчастіше трапляються. Різні реагенти, адсорбенти, вулканізуючі агенти, кислоти, метали, неметали є прикладом рівнів якісних факторів.

При плануванні експерименту фактори повинні бути керованими, тобто експериментатор повинен управляти фактором. У цьому полягає особливість «активного» експерименту. Щоб точно визначити фактор, потрібно вказати послідовність дій (операцій), за допомогою яких встановлюється його конкретне значення (рівні). Таке визначення фактора називається **операційним**. Операційне визначення забезпечує однозначне пониження фактора. З операційним визначенням пов'язані вибір розмірності фактора і точність його фіксації. Точність виміру факторів повинна бути, можливо, вищою. Фактори повинні бути однозначні.

При плануванні експерименту звичайно одночасно змінюються декілька факторів. Тому до них висуваються вимоги **сумісності**. Сумісність факторів означає, що всі їх комбінації досяжні і безпечні. Дуже важлива також при плануванні експерименту **незалежність** факторів на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів. Якщо це умова нездійсненна, то неможливо планувати експеримент. Згідно з вимогами повинна бути відсутня кореляція між факторами. Вимога некорельованості не означає, що між значеннями факторів немає ніякого зв'язку. Вибір факторів - дуже відповідальний етап при підготовці до планування експерименту [17].

4.4 Вибір моделі досліджуваного процесу

Вибрати модель – означає з'ясувати вид функції відгуку, записати її рівняння. Спочатку побудуємо геометричний аналог функції відгуку – **поверхню відгуку**. Для наочності розглянемо випадок з двома факторами, оскільки у разі багатьох факторів геометрична наочність втрачається. Щоб зобразити геометрично можливі стани «чорного ящика» з двома входами, для цього достатньо мати у своєму розпорядженні площину із звичною декартовою системою координат. По одній осі координат відкладемо в деякому масштабі значення (рівні) одного фактора, а по іншій осі – іншого. Тоді кожному стану «ящика» відповідатиме точка на площині, оскільки у кожного фактора є мінімальне і максимальне можливі значення, між якими він може змінюватися безперервно або дискретно. Якщо фактори сумісні, то межі утворюють на площині деякий прямокутник, усередині якого лежать точки, що відповідають станам «чорного ящика». На рис. 4.2 штриховими лініями позначені межі областей визначення кожного з факторів, а суцільними - межі їх сумісної області визначення [17].

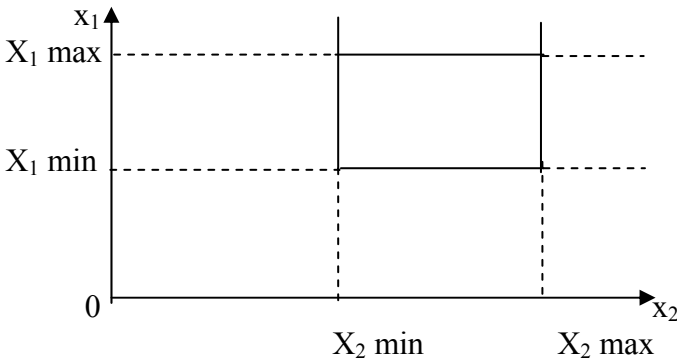


Рисунок 4.2 – Область визначення факторів

Якщо побудувати ще одну вісь (y), то можна вказати параметр оптимізації. У цьому випадку поверхня відгуку матиме такий вигляд (рис. 4.3) [7].

Простір, в якому будується поверхня відгуку, називається **простором фактора**. Він задається координатними осями для знаходження параметра оптимізації. При цьому для двох факторів можна обмежитися площею перерізу. Якщо виробити перетин поверхні відгуку (рис.4.3) площинами, паралельними площині x_1Ox_2 , і спроектувати на цю площину, то на осі координат одержимо лінії, що відповідають параметру оптимізації. Такі лінії називаються лініями рівного відгуку (рис.4.4) [17].

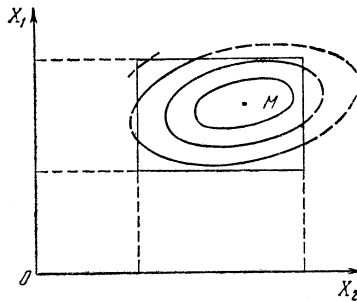


Рисунок 4.3 – Поверхня відгуку

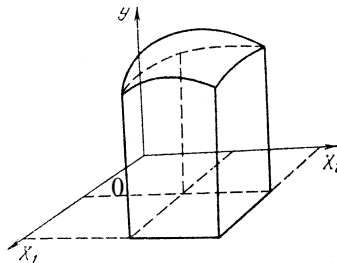


Рисунок 4.4 – Поверхня перетину, спроектована на площину x_1Ox_2

Точка М на рисунку є оптимальною точкою пошуку. Кожна лінія перетину відповідає постійному значенню параметра оптимізації. Ці лінії називаються лініями рівного відгуку. Існує відповідність між станом «ящика» і значенням параметра оптимізації: кожному можливому стану «ящика» відповідає одне значення параметра оптимізації. Зворотне правильне.

Щоб передбачити значення відгуків у тих станах, які не вивчалися експериментально, необхідно будувати **математичну модель**.

Моделей буває багато і різних. Щоб вибрати одну з них, треба зрозуміти, що ми хочемо від моделі і які вимоги до неї ставляться. Головна вимога до моделі – це здатність передбачати напрям подальших дослідів з необхідною точністю. Передбачені за допомогою моделі значення відгуку не повинні відрізнятися від фактичного більш ніж на деяку наперед задану величину. Модель, яка задовольняє таку або якусь аналогічну вимогу, називається **адекватною**. Перевірка здійсненності цієї вимоги називається **перевіркою адекватності моделі**. Якщо декілька різних моделей відповідають потрібним вимогам, то слід віддати перевагу тій з них, яка є найпростішою.

Встановлено [1], що за інших рівних умов моделей краще всього віддавати перевагу відрізкам статичних рядів – поліномам алгебри. Побудова полінома можлива в околах будь-якої точки простору фактора.

Поліномами для двох факторів є:

$$\text{поліном нульового степеня } y = v_0; \quad (4.2)$$

$$\text{поліном першого степеня } y = v_0 + v_1x_1 + v_2x_2; \quad (4.3)$$

поліном другого степеня

$$y = v_0 + v_1x_1 + v_2x_2 + v_{12}x_1x_2 + v_{11}x_1^2 + v_{22}x_2^2; \quad (4.4)$$

поліном третього степеня

$$y = \epsilon_0 + \epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \epsilon_{12} x_1 x_2 + \epsilon_{11} x_1^2 + \epsilon_{22} x_2^2 + \epsilon_{112} x_1^2 x_2 + \epsilon_{112} x_1 x_2^2 + \epsilon_{111} x_1^3 + \epsilon_{222} x_2^3. \quad (4.5)$$

Отже, невідома функція відгуку представлена поліномом. Заміна однієї функції еквівалентною називається **апроксимацією**. Тобто невідома функція у нашому випадку апроксимована поліномом.

Експерименти потрібні тільки для того, щоб знайти чисельне значення коефіцієнтів полінома. Тому чим більше у вибраному поліномі коефіцієнтів, тим більше дослідів виявляться необхідними. А оскільки ми прагнемо скоротити число експериментів (дослідів), то треба знайти такий поліном, який би містив найменше коефіцієнтів, але задовольняв би вимоги, що ставляться до моделі. З рівнянь (4.2) – (4.5) бачимо, що чим нижчий ступінь поліномів, тим менше у ньому коефіцієнтів.

Вибрана модель повинна добре передбачати напрям найшвидшого поліпшення параметра оптимізації. Такий напрям називається **напрямом градієнта**.

У зв'язку з тим, що поліном першого ступеня містить інформацію про напрям градієнта і має мінімально можливе число коефіцієнтів, краще узяти на «озброєння» цю модель. При цьому не зрозуміло, чи буде ця лінійна модель завжди адекватною. Адекватність лінійної моделі гарантується умовами аналітичності функції відгуку. Завжди існує такий окіл будь-якої точки, в якій лінійна модель адекватна. Адекватність моделі можна перевірити за результатами експерименту. Після вибору довільної підобласті знаходимо її необхідні розміри, а потім рухатимемося по градієнту.

На наступному етапі шукатимемо лінійну модель вже в іншій підобласті. Цикл повторюється до того часу, поки рух по градієнту не перестане давати ефект. Це означає, що ми потрапили в область, близьку до оптимуму. Та-

ка область називається «майже стаціонарною». Тут лінійна модель вже не потрібна. Або ми потрапляємо в майже стаціонарну область, і задача розв'язана, або треба переходити до поліномів вищих степенів.

4.5 Вибір експериментальної області чинника (фактора) простору

При виборі області експерименту перш за все треба оцінити межі областей визначення факторів. При цьому повинні враховуватися обмеження декількох типів.

Перший тип - принципові обмеження для значень факторів, які не можуть бути порушені ні за яких обставин. Наприклад, якщо фактор – температура, то нижньою межею буде абсолютний нуль.

Другий тип – обмеження, пов'язані з техніко-економічними міркуваннями, наприклад, з вартістю сировини, дефіцитністю окремих компонентів, часом ведення процесу.

Третій тип обмежень, з яким найчастіше доводиться мати справу, визначається конкретними умовами проведення процесу. Наприклад, існуючою апаратурою, технологією, організацією.

Оптимізація звичайно починається в умовах, коли об'єкт вже піддавався деяким дослідженням. Інформація, яка міститься в результатах попередніх досліджень, називається апріорною [17]. Апріорну інформацію можна використовувати для отримання уявлення про параметр оптимізації, про фактори, про найкращі умови ведення процесу і характер поверхні відгуку, тобто про те, як сильно змінюється параметр оптимізації при невеликих змінах значень факторів, а також про кривину поверхні.

Таким чином, вибір експериментальної області простору фактора пов'язаний з ретельним аналізом апріорної інформації.

Після вибору області визначення треба знайти локальну підобласть для планування експерименту. Для цього необхідно вибрати основний рівень та інтервал варіювання.

4.6 Вибір основного рівня

Комбінація рівнів факторів є якнайкращою умовою, визначеною з аналізу апріорної інформації. Кожна комбінація є багатовимірною точкою в просторі фактора. Її можна розглядати як початкову точку для побудови плану експерименту. Ця точка називається **основним (нульовим) рівнем** [17]. Побудова плану експерименту зводиться до вибору експериментальних точок, симетричних щодо нульового рівня. Якщо є дані про координати однієї найкращої точки і немає інформації про межі визначення факторів, то залишається розглядати цю точку як основний рівень. Аналогічне рішення ухвалюється, якщо межі відомі і якнайкращі умови лежать усередині області. Основний рівень вибирають з деяким зрушенням від найкращих умов.

За умови, що координати найкращої точки невідомі, але є відомості про деяку підобласть, в якій процес йде добре, тоді основний рівень вибирають або в центрі, або у випадковій точці цієї підобласті.

Можливий випадок також з деякими еквівалентними точками, координати яких різні. За відсутності додаткових даних (технологічних, економічних і т.д.) можна вибір робити довільно. Якщо експеримент недорогий і не вимагає багато часу, можна приступити до побудови планів експериментів навколо декількох точок.

Ухвалення рішень при виборі основного рівня зображено на рис. 4.5 у вигляді блок-схеми.

Після вибору основного (нульового) рівня вибираємо інтервал варіювання.

4.7 Вибір інтервалів варіювання

Інтервалом варіювання факторів називається деяке число, надбавка якого до основного рівня дає верхній, а віднімання – нижній рівні факторів. Відстань на координатній осі між основним і верхнім (або нижнім) рівнем і є інтервалом варіювання. Тому, щоб вибрати рівні, необхідно спочатку вибрати інтервал варіювання.

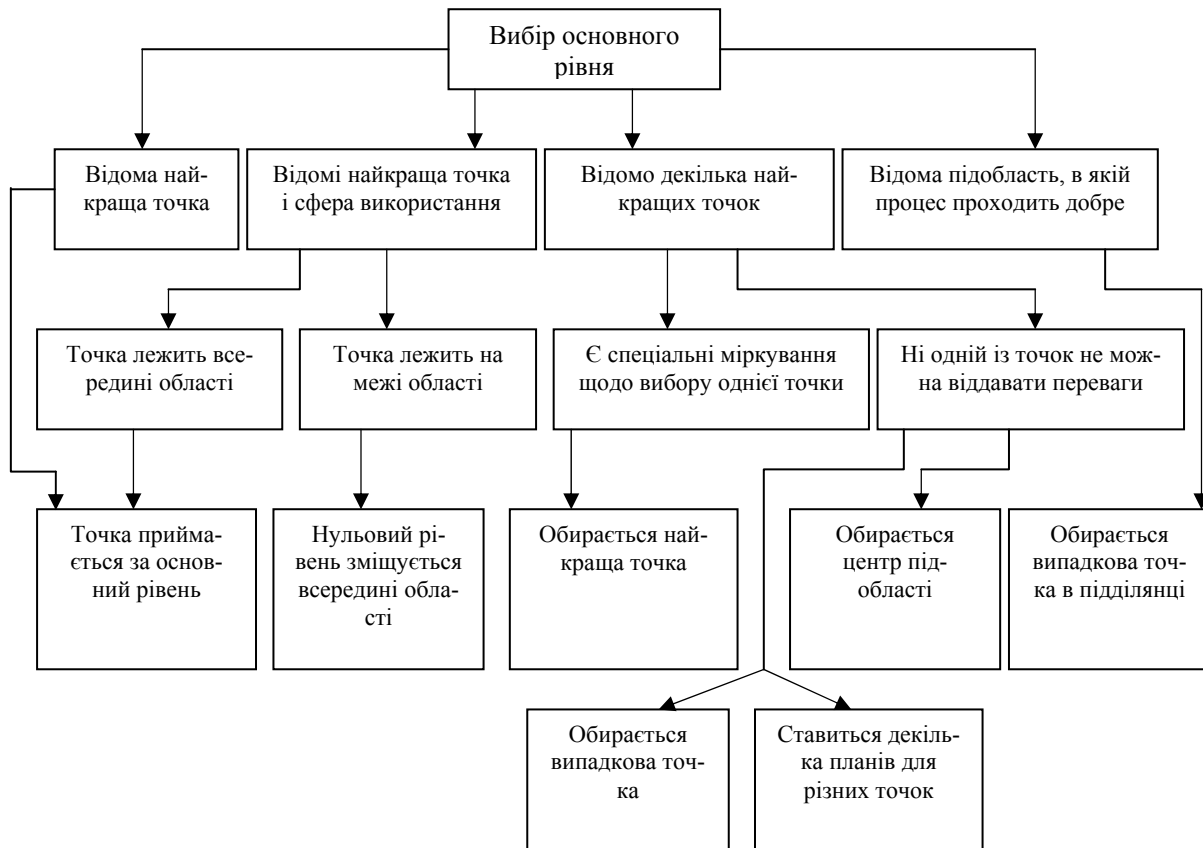
Для спрощення запису умов експерименту і обробки експериментальних даних масштаби по осях вибираються так, щоб верхній рівень відповідав +1, нижній – 1, а основний 0.

На вибір інтервалу варіювання накладаються природні обмеження зверху і знизу: інтервал варіювання не може бути менше тієї помилки, з якою експериментатор фіксує рівень фактора, інакше верхній і нижній рівні факторів виявляться невиразні. Інтервал варіювання не може бути також дуже великим, інакше верхній і нижній рівні виявляться за межами області визначення.

Вибір інтервалів варіювання пов'язаний з неформалізованим етапом планування експерименту.

Для інтервалів варіювання вводиться градація: широкий, середній і вузький. Розмір інтервалу варіювання становить деяку частку від області визначення фактора. Визначено, що, якщо інтервал варіювання становить не більше 10% від області визначення, потрібно вважати його вузьким, не більше 30% - середнім і в решті випадків – широким.

Точність фіксації факторів визначається точністю приладів і стабільністю рівня у ході досліду. Для спрощення цієї схеми прийнято наближену класифікацію: низьку, середню і високу.



Уявленнями про кривизну поверхні відгуку можуть служити графіки залежностей (рис.4.3, 4.4), а також теоретичні міркування. З графіків зведення про кривизну можна отримати візуально. Про кривизну поверхні можна також робити висновок з аналізу табличних даних, оскільки наявності кривизни відповідає непропорційна зміна параметра оптимізації при рівномірній зміні фактора. Встановлено розрізняти три випадки: функція відгуку лінійна, функція відгуку істотно нелінійна та інформація про кривизну відсутня [17]. Якщо є результати деякої безлічі дослідів, то визначають найбільше і найменше значення параметра оптимізації. Різницю між цими значеннями називають діапазоном зміни параметра оптимізації для даної безлічі дослідів. Розрізняють широкий і вузький діапазони. Діапазон буде вузьким, якщо він неістотно відрізняється від розкиду значень параметра оптимізації в повторних дослідах. Інакше діапазон вважається широким. Отже, щоб ухвалити рішення, необхідно використовувати апіорну інформацію про точність фіксації факторів, кривизну поверхні відгуку і діапазон зміни параметра оптимізації.

4.8 Повний факторний експеримент типу 2^K

Повним факторним експериментом називається експеримент, в якому реалізують всі можливі поєднання рівнів факторів. Повний факторний експеримент ґрунтується на варіюванні факторів на двох рівнях. Якщо число факторів відоме, то можна відразу знайти число дослідів, необхідних для реалізації всіх можливих поєднань рівнів чинників, за формулою

$$N = 2^K, \quad (4.6)$$

де N – число дослідів; 2 – число рівнів; K – число факторів.

Якщо число рівнів кожного фактора дорівнює двом, а число факторів дорівнює також двом, то матимемо повний факторний експеримент типу 2^K , тобто 2^2 .

Знаючи кількість рівнів – 2 і число факторів – 2, складаємо матрицю планування експерименту 2^2 (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Матриця планування експерименту 2^2

Номер досліджу	Кодування числа факторів		Параметр оптимізації у
	X_1	X_2	
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Рядки в цій таблиці відповідають різним дослідям, а стовпчики – значенням факторів. Кожен стовпчик в матриці планування називається вектором-стовпчиком, а кожен рядок – вектором-рядком.

Таким чином, у табл. 4.1 ми маємо два вектори-стовпчики незалежних змінних і один вектор-стовпчик параметра оптимізації.

Матрицю планування експерименту $N = 2^2$ можна зобразити графічно. Для цього знайдемо в області визначення факторів точку, що відповідає основному рівню, і проведемо через неї нові осі координат, паралельні осям натуральних значень факторів. Після цього виберемо масштаби по нових осях так, щоб інтервал варіювання для кожного фактора дорівнював одиниці. Тоді умови проведення дослідів відповідатимуть вершинам квадрата, центром якого є основний рівень, а кожна сторона паралельна одній з осей координат і дорівнює двом інтервалам (рис. 4.6).

Номери вершин квадрата відповідають номерам дослідів у матриці планування. **Площа, обмежена квадратом, називається областю експерименту.**

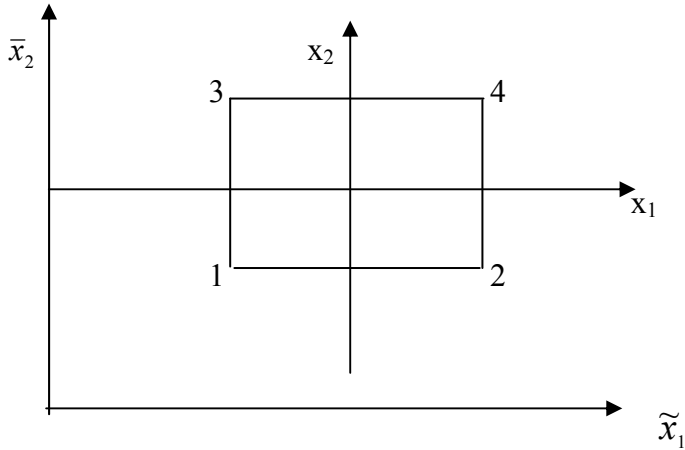


Рисунок 4.6 – Геометрична інтерпретація повного факторного експерименту 2^2

Якщо для двох факторів усі можливі комбінації рівнів легко знайти прямим перебором, то із зростанням числа факторів виникає необхідність в деякому прийомі побудови матриць. З багатьох можливих прийомів використовуватимемо тільки один, що базується на правилі чергування знаків. При цьому методі у першому стовпчику знаки змінюються по черзі, у другому стовпчику вони чергуються через два, у третьому – через 4, а в четвертому – через 8 і т.д. по степенях двійки.

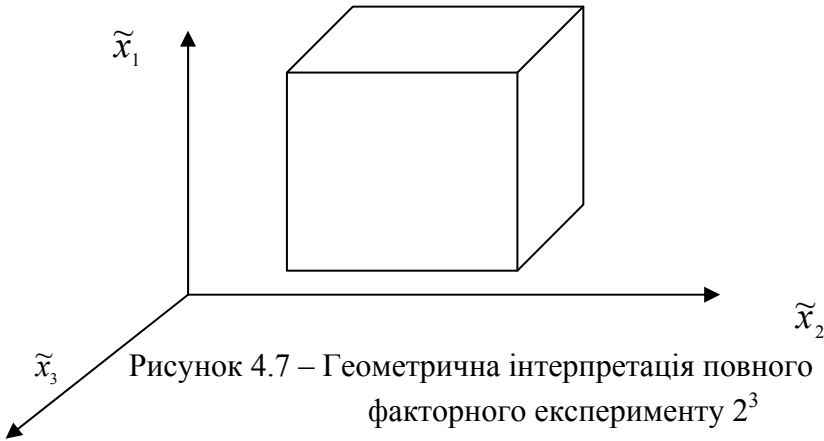
За аналогією до повного факторного експерименту 2^2 можна дати геометричну інтерпретацію повного факторного експерименту 2^3 - це куб, координати вершин якого задають умови дослідів.

Якщо помістити центр куба в точку основного рівня факторів, а масштаби по осях вибрати так, щоб інтервал варіювання дорівнював одиниці, то отримаємо куб (рис.4.7). Куб задає область експерименту, а центр куба є його центром.

4.8.1 Властивості повного факторного експерименту

Експеримент планується для того, щоб одержати модель, яка має оптимальні властивості. Це означає, що оцінки коефіцієнтів моделі повинні бути якнайкращими і що точність прогнозу параметра оптимізації не повинна залежати від напряму у просторі чинника, бо наперед невідомо, куди належить рухатися у пошуках оптимуму.

З побудови матриці впливає чотири властивості. Перша – **симетричність** щодо центра експерименту. Ця властивість формулюється таким чином: сума алгебри елементів вектора-стовпчика кожного фактора дорівнює нулю, або $\sum_{i=1}^N x_{ji} = 0$, де j – номер фактора, який дорівнює 1, 2, ..., K ; i – номер стовпчика; N – число дослідів.



Друга – умова **нормування**. Воно формується таким чином: сума квадратів елементів кожного стовпчика

дорівнює числу дослідів, або $\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 = N$.

Третя – сума почленних добутків будь-яких двох векторів-стовпчиків матриці дорівнює нулю, або

$$\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} = 0, \quad j, u, i, u = 0, 1, 2, \dots, K. \quad \text{Ця властивість називається}$$

ортогональністю матриці планування.

Четверта – точки у матриці планування підбираються так, що точність прогнозу значень параметра оптимізації однакова на різних відстанях від центра експерименту і не залежить від напрямку. Ця властивість називається **рототабельністю** [17].

4.8.2 Математична модель повного факторного експерименту

Для руху до точки оптимуму при $N = 22$ (табл. 4.1) нам потрібна лінійна модель $y = y_0 + v_1 x_1 + v_2 x_2$. Необхідно за результатами експерименту знайти значення невідомих коефіцієнтів моделі. Коефіцієнти моделі обчислюються за формулою

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \quad (4.7)$$

де $j = 0, 1, 2, \dots, n$.

Скористаємося цією формулою для підрахунку коефіцієнтів v_1 і v_2 :

$$v_1 = \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4}{4}, \quad (4.8)$$

$$v_2 = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4}{4}. \quad (4.9)$$

Для підрахунку коефіцієнтів v_1 використовується вектор-стовпчик x_1 , а для v_2 – вектор-стовпчик x_2 (див. табл. 4.1). Коефіцієнт v_0 визначається з умови, що $y = v_0 + v_1x_1 + v_2x_2$ справедливе, отже, воно справедливе і для середніх арифметичних значень змінних $\bar{y} = v_0 + v_1\bar{x}_1 + v_2\bar{x}_2$. Через властивість симетрії $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 0$.

Отже, $\bar{y} = v_0$, тобто v_0 є середньоарифметичне значення параметра оптимізації. Щоб його одержати, необхідно скласти всі U і розділити на число дослідів. Щоб привести цю процедуру у відповідність з формулою для обчислення коефіцієнтів, ми в матрицю планування введемо вектор-стовпчик фіктивної змінної x_0 , яка набуває у всіх випадках значення $+1$. Тому лінійну модель $y = v_0 + v_1x_1 + v_2x_2$ запишемо у вигляді

$$y = v_0x_0 + v_1x_1 + v_2x_2. \quad (4.10)$$

Коефіцієнти при незалежних змінних вказують на силу впливу факторів: чим більша чисельна величина коефіцієнтів, тим більший вплив надає фактор. Якщо коефіцієнт має знак плюс, то із збільшенням значення фактора параметр оптимізації збільшується, а якщо мінус - зменшується.

Величина коефіцієнта відповідає внеску даного чинника у величину параметра оптимізації під час переходу чинника з нульового рівня на верхній або нижній.

На першому етапі планування експерименту ми прагнемо одержати лінійну модель. Проте у нас немає гарантії, що у вибраних інтервалах варіювання процес описується лінійною моделлю. Один з видів нелінійності, що часто трапляється, пов'язаний з тим, що ефект одного фактора залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. У цьому випадку має місце ефект взаємодії двох факторів.

Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінювати ефекти взаємодії. Для цього треба, користуючись правилом перемножування стовпчиків, одержати стовпчик добутку двох факторів. Для повного факторного експерименту 2^2 матрицю планування з урахуванням ефекту взаємодії подано у табл. 4.2.

Тепер модель виглядатиме так:

$$y = v_0x_0 + v_1x_1 + v_2x_2 + v_{12}x_1x_2 \quad (4.11)$$

Коефіцієнт v_{12} обчислюється звичайно, як і вся решта коефіцієнтів. Стовпчики x_1 і x_2 задають планування – за ними визначають умови дослідів, а стовпчики x_0 і x_1x_2 служать тільки для розрахунку.

Таблиця 4.2 – Матриця планування експерименту 2^2 з ефектом взаємодії

Номер дослідів	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4

Із збільшенням числа факторів число можливих взаємодій швидко зростає.

Матриця планування 2^3 з урахуванням всіх можливих взаємодій наведена у табл. 4.3.

Ефект взаємодії $x_1x_2x_3$ одержують перемножуванням всіх трьох стовпчиків і називають ефектом взаємодії другого порядку, а ефект взаємодії двох факторів називають ефектом взаємодії першого порядку.

Таблиця 4.3 – Повний факторний експеримент 2^3

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Матриця планування експерименту 2^3 матиме вигляд (табл. 4.4).

Після обчислення коефіцієнтів моделі виконуємо перевірку її придатності, тобто перевірку адекватності моделі. Функція відгуку, що цікавить нас, тобто рівняння регресії [17], має вигляд

$$y = v_0 + v_1x_1. \quad (4.12)$$

Це рівняння прямої лінії. У ньому два невідомі коефіцієнти. Коли ми ставимо експеримент, то прагнемо провести більше дослідів, ніж число невідомих коефіцієнтів. Тому система лінійних рівнянь

$$\xi_i = y_i - v_0 - v_1x_{1i}$$

виявляється приреченою і часто суперечливою. Приреченість виникає, коли число рівнянь більше від числа невідомого; суперечність – коли деякі з рівнянь не сумісні один з одним. Якщо всі експериментальні точки лежать на прямій, то система має єдиний розв'язок.

Застосовуючи метод найменших квадратів (МНК), можна зробити визначеною будь-яку довільну систему рівнянь. Цей метод робить число рівнянь таким, що

дорівнює числу невідомих коефіцієнтів. У рівнянні (4.12) два неві

Таблиця 4.4 - Матриця планування експерименту 2^3

Найменування	Вільний член	\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3	$\tilde{x}_1\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_2\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3$	\tilde{y}
Основний рівень									
Інтервал варіювання									
Верхній рівень (+1)									
Нижній рівень (-1)									
Код досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

домі коефіцієнти. Застосовуючи МНК, одержимо два рівняння:

$$I = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 = \min, \quad (4.13)$$

або

$$I = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \epsilon_{oi} - \epsilon_1 x_{1i})^2 = \min. \quad (4.14)$$

Величина $\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2$ і є залишкова сума квадратів. МНК гарантує, що ця величина мінімально можлива. Залишкова сума найменших квадратів цілком підходить для характеристики середнього відхилення щодо лінії регресії і залежить від числа коефіцієнтів у рівнянні. Ввівши стільки коефіцієнтів, скільки проведено незалежних дослідів, одержимо залишкову суму, що дорівнює нулю. Тому її відносять на один «вільний» дослід. Число таких дослідів називається числом ступенів вільності (f); числом ступенів вільності у статистиці називають різницю між числом дослідів і числом коефіцієнтів (констант), які вже обчислені за результатами дослідів незалежно один від одного.

Якщо проведений повний експеримент фактора 2^3 і знайдено лінійне рівняння регресії, то число ступенів вільності обчислюється за формулою

$$f = N - (K_0 + 1) = 8 - (3 + 1) = 4. \quad (4.15)$$

Залишкова сума квадратів, ділена на число ступенів вільності, називається залишковою дисперсією, або дисперсією адекватності ((S_{ad}^2)):

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}. \quad (4.16)$$

У плануванні експерименту число ступенів вільності для дисперсії адекватності дорівнює числу різних дослі-

дів, результати яких використовуються при підрахунку коефіцієнтів регресії, мінус число визначуваних коефіцієнтів.

Для перевірки гіпотези про адекватність можна використовувати критерій Фішера - F-критерій:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (4.17)$$

де $S_{\{y\}}^2$ - дисперсія відтворюваності зі своїм числом ступенів вільності [1].

Значущість коефіцієнтів за t-критерієм визначається за формулою

$$t = \frac{|\epsilon_j|}{S_{\{\epsilon_j\}}}, \quad (4.18)$$

де ϵ_j – коефіцієнт моделі; $S_{\{\epsilon_j\}}$ – квадратична помилка коефіцієнта регресії.

Обчислене значення t – критерію порівнюється з табличним при заданому α і у відповідному числі ступенів вільності. Чим вужчий довірчий інтервал (при заданому α), тим більша вірогідність значущості коефіцієнта.

Якщо абсолютна величина коефіцієнта більша, ніж довірчий інтервал, то коефіцієнт значущий.

4.9 Дробовий факторний експеримент

При проведенні повного факторного експерименту встановлено, що кількість дослідів у повному факторному експерименті значно перевершує число визначуваних коефіцієнтів лінійної моделі. Нашим завданням є скорочення числа дослідів за рахунок тієї інформації, яка не дуже істотна при побудові лінійних моделей. При цьому матриця планування не повинна позбутися своїх оптимальних властивостей.

У табл. 4.2 представлений повний експеримент фактора 2^2 . Результати цього експерименту наведені у вигляді

неповного квадратного рівняння у формулі (4.11). Якщо у вибраних інтервалах варіювання процес може бути описаний лінійною моделлю, то достатньо визначити три коефіцієнти: u , v_1 і v_2 . Залишається один ступінь вільності. При лінійному наближенні (табл. 4.2) $v_{12} > 0$ і вектор-стовпчик x_1x_2 можна використовувати для нового фактора x_3 . Складемо таблицю і визначимо оцінки коефіцієнтів (табл. 4.5). У цій таблиці не буде трьох роздільних оцінок як у повному експерименті фактора 2^k , оскільки оцінки змішуються: $v_1 > \beta_1 + \beta_{23}$; $v_2 > \beta_2 + \beta_{13}$; $v_3 > \beta_3 + \beta_{12}$.

Таблиця 4.5 – Дробовий експеримент фактора 2^3

Номер дослід	x_0	x_1	x_2	x_3	Y
1	+	-	-	+	Y_1
2	+	+	-	-	Y_2
3	+	-	+	-	Y_3
4	+	+	+	+	Y_4

Оскільки у нас лінійна модель, то всі парні взаємодії незначущі. Таким чином, ми мінімізували число дослідів: замість восьми дослідів для вивчення трьох факторів поставимо чотири. При цьому матриця планування не втрачає своїх оптимальних властивостей (ортогональність, рототабельність і т.д.). Правило побудови дробового факторного експерименту формулюється так: **щоб скоротити число дослідів, потрібно новому фактору привласнити вектор-стовпчик матриці, що належить взаємодії, якою можна знехтувати. Тоді значення нового фактора в умовах дослідів визначається знаками цього стовпчика.**

Поставивши чотири дослідів для оцінки трьох факторів, ми скористалися половиною повного експерименту фактора 2^3 , або «**напівреплікою**».

Якщо x_3 прирівняти до x_1x_2 , то одержимо другу половину матриці 2^3 . При реалізації обох напівреплік одержимо роз-

дільні оцінки для лінійних ефектів і ефектів взаємодії, як в повному експерименті фактора 2^3 . Об'єднання цих двох напівреплік і є повний експеримент фактора 2^3 .

Матриця з восьми дослідів для планування чотиричинника буде напівреплікою від повного експерименту фактора 2^4 , а для планування п'ятичинника – чвертьреплікою 2^5 . У останньому випадку два лінійні ефекти прирівнюються до ефектів взаємодії. Для позначення дробових реплік, в яких p лінійних ефектів прирівняні до ефектів взаємодії, зручно користуватися умовним позначенням 2^{k-p} . Так, напіврепліка від 2^6 запишеться у вигляді 2^{6-1} , а чвертьрепліка від 2^5 – у вигляді 2^{5-2} .

Умовне позначення дробових реплік і число дослідів наведені у табл. 4.6.

При побудові напіврепліки 2^{3-1} існує всього дві можливості: прирівняти x_3 до $+x_1x_2$ або $K_0 -x_1x_2$. Тому є тільки дві напіврепліки 2^{3-1} (табл. 4.7).

Для добутку трьох стовпчиків матриці I виконується співвідношення: $+1 = x_1x_2x_3$, а в матриці II $-(-1) = x_1x_2x_3$. Усі знаки стовпчиків добутків однакові: у першому випадку дорівнюють плюс одиниці, а в другому – мінус одиниці. Символічне позначення добутків стовпчиків, що дорівнює $+1$ або -1 , називається визначальним **контрастом**.

Таблиця 4.6 - Умовне позначення дробових реплік і число дослідів

Число факторів	Дробова репліка	Умовне позначення	Число дослідів	
			для дробової репліки	для повного факторного експерименту
1	2	3	4	5
3	1/2 - репліка від 23	23-1	4	8
4	1/2 - репліка від 24	24-1	8	16

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5
5	1/4 - репліка від 25	25-2	8	32
6	1/8 - репліка від 26	26-3	8	64
7	1/16 - репліка від 27	27-4	8	128
5	1/2 - репліка від 25	25-1	16	32
6	1/4 - репліка від 26	26-2	16	64
7	1/8 - репліка від 27	27-3	16	128
8	1/16 - репліка від 28	28-4	16	256
9	1/32 - репліка від 29	29-5	16	512
10	1/64 - репліка від 210	210-6	16	1024
11	1/128 - репліка від 211	211-4	16	2048
12	1/256 - репліка від 212	212-8	16	4096
13	1/512 - репліка від 213	213-9	16	8192
14	1/1024 - репліка від 214	214-10	16	16884
15	1/2048 - репліка від 215	215-11	4	8

Таблиця 4.7 – Дві напіврепліки 2^{3-1}

Номер досліду	I $x_3 = +x_1x_2$				Номер досліду	II $x_3 = -x_1x_2$			
	x_1	x_2	x_3	$x_1x_2x_3$		x_1	x_2	x_3	$x_1x_2x_3$
1	-	-	+	+	1	-	-	-	-
2	+	-	-	+	2	+	-	+	-
3	-	+	-	+	3	-	+	+	-
4	+	+	+	+	4	+	+	-	-

Контраст допомагає визначити змішані ефекти. Для того щоб визначити, який ефект змішаний з даним, потрібно помножити обидві частини визначального контрасту на стовпчик, що відповідає даному ефекту. Так, якщо $1 = x_1x_2x_3$, то для x_1 маємо $x_1 = x_1^2x_2x_3 = x_2x_3$. Оскільки завжди $x_1^2 = 1$, то для x^2 знаходимо $x_2 = x_1x_2x_2^2 = x_1x_2$, для $x_3 = x_1x_2x_3^2 = x_1x_2$.

Це означає, що коефіцієнти лінійного рівняння будуть оцінками $\beta_1 > \beta_1 + \beta_{23}$, $\beta_2 > \beta_2 + \beta_{13}$, $\beta_3 > \beta_3 + \beta_{12}$.

Співвідношення, що показує, з яким з ефектів змішаний даний ефект, називається **генеруючим співвідношенням**. Матриця планування для $N = 2^{4-1}$ наведена у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 - Матриця планування для 2^{4-1}

Номер досліду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1x_2 = x_2x_4$	$x_1x_3 = x_2x_4$	$x_2x_3 = x_1x_4$
1	+	+	+	-	-	+	-	-
2	+	-	-	-	-	+	+	+
3	+	+	-	-	+	-	-	+
4	+	-	+	-	+	-	+	-
5	+	+	+	+	+	+	+	+
6	+	-	-	+	+	+	-	-
7	+	+	-	+	-	-	+	-
8	+	-	+	+	-	-	-	+

4.10 Обробка результатів експерименту

4.10.1 Реалізація плану експерименту

Перш ніж проводити експерименти, необхідно ретельно підготуватися: зібрати дослідну установку, перевірити прилади, підготувати сировину, скласти спеціальний журнал і т.д. У журналі першу сторінку можна присвятити вибору мети дослідження і параметрам оптимізації із зазначенням їх розмірності. Бажано перелічити усі параметри, які можуть бути характеристиками процесу, і зазначити, яка між ними існує кореляція. Якщо ж відомості про кореляцію відсутні, доцільно підрахувати коефіцієнти парної кореляції, перевірити їх значущість і виділити групу некорельованих параметрів. На другій сторінці перелічити фактори і помістити таблицю рівнів факторів та інтервалів варіювання. Матрицю планування зручно розмістити на розвороті журналу. У ній доцільно проставляти не тільки кодові значення факторів, але й натуральні.

При складанні робочої матриці планування необхідно залишити місце для стовпчиків, у яких зазначаються дані поставлення дослідів. Окремі сторінки потрібно відвести для розрахунків, які необхідні для визначення кількості усіх компонентів і т.д., а також для аналізу результатів експерименту [17].

Перш ніж проводити експерименти, необхідно:

- стисло описати процеси, об'єкти;
- дати формулювання мети дослідження;
- зробити вибір параметрів оптимізації;
- визначитися з бажаним результатом, числом і точністю вимірювань;
- встановити, який результат вважатиметься відмінним, добрим, задовільним або незадовільним.

При виборі факторів потрібно:

- скласти список усіх «підозрюваних» факторів, які можуть впливати на процес;
- скласти список факторів, що включаються в реальний експеримент;
- встановити, чи існують можливості встановлення значення фактора на будь-якому заданому рівні;
- визначити, чи зберігаються задані значення рівнів протягом досліджу;
- передбачити, чи можуть деякі комбінації рівнів факторів призвести до зупинення процесу (вибух, нетехнологічність і т.д.).

При визначенні числа дослідів необхідно:

- визначитися з бажаним числом дослідів, обмеженнями на число дослідів;
- встановити бажаний термін проведення дослідження;
- встановити тривалість проведення одного досліджу;
- розрахувати вартість і витрати праці при проведенні одного досліджу;
- визначити число рівнів для одного фактора;
- визначити можливість проведення паралельних дослідів;
- встановити стратегію проведення дослідів (по одному за день і т.д.).

При проведенні експериментальної частини повинна враховуватися апріорна інформація. З неї необхідно врахувати таке:

- умови і результати, досягнуті при вивченні аналогічних процесів;
- результати попереднього експерименту і дані (літературні і природні) про величину помилки експерименту;
- взаємодію факторів.

4.10.2 Помилка паралельних дослідів і перевірка однорідності дисперсій

Поставлення паралельних (повторних) дослідів не дає повністю збіжних результатів, тому що завжди існує помилка дослідів. Помилку дослідів визначають за паралельними дослідями. Для цього дослід проводиться по можливості в однакових умовах кілька разів і потім береться середнє арифметичне всіх результатів. Середнє арифметичне \bar{y} дорівнює сумі усіх n окремих результатів, поділених на кількість паралельних дослідів n :

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_1^n y_q}{n} \quad (4.19)$$

Відхилення результату дослідів від середнього арифметичного можна подати як різницю $y_q - \bar{y}$, де y_q – результат окремого дослідів. Наявність відхилення свідчить про мінливість, варіацію значень повторних дослідів. Для вимірювання цієї мінливості використовують дисперсію. **Дисперсією називається середнє значення квадрата відхилень величини від її середнього значення.** Дисперсія позначається S^2 і виражається формулою

$$S^2 = \frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (4.20)$$

де $n-1$ – число ступенів вільності, що дорівнює кількості дослідів, мінус одиниця.

Перевірка однорідності дисперсій проводиться за допомогою різних статистичних критеріїв. Простим з них є критерій Фішера (F-критерій). Він є відношенням більшої дисперсії до меншої. Отримана величина порівнюється з табличною величиною F-критерію (табл.4.9).

Якщо набуте значення дисперсійного відношення більше наведеного у таблиці для відповідних ступенів вільності і вибраного рівня значущості, це означає, що дисперсії значущо відрізняються одна від одної, тобто що вони неоднорідні [17].

4.10.3 Перевірка значущості коефіцієнтів

Вона здійснюється двома рівноцінними способами: перевіркою за t-критерієм Стьюдента або побудовою довірчого інтервалу. При використуванні повного експерименту фактора або регулярних дробових реплік довірчі інтервали для всіх коефіцієнтів дорівнюють один одному.

Спочатку визначаємо дисперсію коефіцієнта регресії $S^2_{\{ej\}}$ за формулою

$$S^2_{\{ej\}} = \frac{S^2_{\{y\}}}{N},$$

якщо паралельні досліди відсутні (4.21).

З формули бачимо, що дисперсії всіх коефіцієнтів дорівнюють одна одній, оскільки вони залежать тільки від помилки досліду та їх числа.

Тому формула довірчого інтервалу $\Delta\beta_j$ матиме вигляд $\Delta\beta_j = \pm t \cdot S(ej)$, де t – табличне значення критерію Стьюдента при числі ступенів вільності, з якими визначалася $S^2_{\{y\}}$, і вибраному рівні значущості (як правило, 0,05); $S_{\{ej\}}$ - квадратична помилка коефіцієнта регресії,

$$S_{\{ej\}} = +\sqrt{S^2_{\{ej\}}}. \quad (4.22)$$

Формула для довірчого інтервалу має вигляд

$$\Delta \sigma_j = \pm \frac{t \cdot S_{(y)}}{\sqrt{N}}. \quad (4.23)$$

Коефіцієнт $\Delta \beta_j$ визначимо, якщо його абсолютна величина більше довірчого інтервалу. Довірчий інтервал задається верхньою і нижньою межами $\sigma_j + \Delta \beta_j$ і $\sigma_j - \Delta \beta_j$.

Для пошуку значень t-критерію необхідно скористатися таблицею 4.10.

Таблиця 4.9 – Значення F-критерію Фішера при 5% рівні значущості

Число ступенів вільності		2	3	4	5	6	12	24	∞
f_1	f_2								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,6	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,9
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
28	4,2	3,3	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3

Таблиця 4.10 - Значення t-критерію Стьюдента при 5% рівні значущості [17]

Число ступенів вільності	Значення t-критерію	Число ступенів вільності	Значення t-критерію	Число ступенів вільності	Значення t-критерію
1	12,71	11	2,201	21	2,080
2	4,303	12	2,179	22	2,074
3	3,182	13	2,160	23	2,069
4	2,776	14	2,145	24	2,064
5	2,571	15	2,131	25	2,060
6	2,447	16	2,120	26	2,056
7	2,365	17	2,110	27	2,052
8	2,306	18	2,101	28	2,048
9	2,262	19	2,093	29	2,045
10	2,228	20	2,086	30	2,042
				?	1,960

4.10.4 Круте сходження по поверхні відгуку

Щоб знайти оптимальну точку пошуку (рис. 4.8), необхідно здійснити рух по градієнту.

На рисунку зображені криві рівного виходу поверхні відгуку для двох незалежних змінних x_1 і x_2 . Поверхня відгуку має вид горба з вершиною у точці «0». Щоб потрапити в окіл цієї точки з точки А, проводимо напрям градієнта функції відгуку. Це напрям АВ, перпендикулярний до ліній рівня. Градієнт безперервної однозначної функції Φ є вектором

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{dx_1}i + \frac{\partial\varphi}{dx_2}j + \dots + \frac{\partial\varphi}{dx_k}k, \quad (4.24)$$

де $\Delta\varphi$ – позначення градієнта; $\partial\varphi/dx_1$ - частинна похідна функції за і-м фактором; i, j, K – одиничні вектори у напрямку координатних осей. Отже, складові градієнта – це частинні похідні функції відгуку, оцінками яких є коефіцієнти регресії.

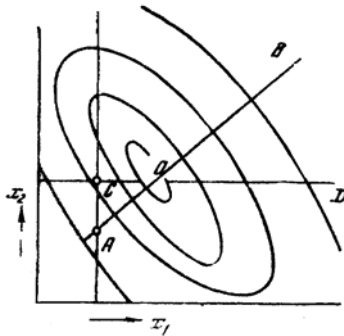


Рисунок 4.8 – Рух по поверхні відгуку методами експерименту одночинника і градієнта

Змінюючи незалежні змінні пропорційно величині коефіцієнтів регресії, рухатимемося у напрямі градієнта функції відгуку по найкрутішому шляху. Процедура руху до майже стаціонарної області називається **крутим сходженням**.

Техніку розрахунку крутого сходження розглянемо на прикладі одного фактора (рис.4.9).

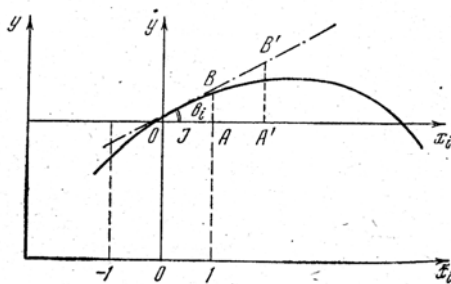


Рисунок 4.9 – Розрахунок координат точок у напрямі градієнта

Значення коефіцієнта регресії дорівнює тангенсу кута між лінією регресії і віссю даного фактора. Якщо його помножити на інтервал варіювання, який є прилеглим катетом у прямокутному трикутнику OAB , то отримаємо протилежний катет AB , який і дає координатні точки, що лежать на градієнті.

Узагальнення на випадок K факторів робиться механічно, оскільки всі ефекти незалежні один від одного. Істотне тільки співвідношення добутоків коефіцієнтів на відповідні інтервали. Їх абсолютні величини можуть усі одночасно множитися або ділитися на будь-яке позитивне число. При цьому отримаємо точки, що лежать на тому ж градієнті, але з іншим кроком. Ця процедура полягає в тому, щоб до нульового рівня послідовно алгебраїчно додавати величини, пропорційні складовим градієнта. Якщо буде невеликий крок, то він потребуватиме значного числа дослідів, а великий крок збільшує вірогідність проскакування області оптимуму [17].

Для якісних факторів на двох рівнях або фіксується кращий рівень, або градієнт реалізується двічі для кожного рівня окремо. Незначущі фактори стабілізуються на будь-якому рівні в інтервалі ± 1 . Якщо немає спеціальних міркувань, а за економічними міркуваннями вигідно підтримувати нижній рівень, то вибирають його. У русі по градієнту ці фактори не беруть участі. Розрахунок крутого сходження зводиться до того, щоб вибрати крок руху по одному з факторів і пропорційно добуткам коефіцієнтів регресії на інтервали варіювання розрахувати кроки за іншими факторами.

Розрахувавши складові градієнта, одержимо умови уявних дослідів. Число уявних дослідів залежить від задачі. Обмеженням зверху служить межа області визначення хоча б по одному з факторів. Іноді за технологічними мір-

куваннями немає сенсу визначати умови багатьох дослідів. Як правило, розраховується близько п'яти уявних дослідів.

Умови уявних дослідів слід ретельно обдумати і переконатися, що немає ускладнень в їх реалізації. Якщо щось не вдається, можна змінити крок і розрахувати уявні досліді заново.

Круте сходження можна вважати ефективним, якщо хоча б один з реалізованих дослідів дасть кращий результат порівняно з найкращим дослідом серії. Коли круте сходження неефективне, ухвалення рішення залежить від певної ситуації (далеко від оптимуму, близько, невизначено) і від адекватності лінійної моделі. Якщо область оптимуму близька при реалізації матриці планування і вдалося досягти достатньо високого значення параметра оптимізації, і при крутому сходженні поліпшити його не вдалося, то найтипівішими є такі рішення: 1) закінчити дослідження (вибирається кращий дослід); 2) побудувати план другого порядку для опису області оптимуму.

Якщо область оптимуму далека і лінійна модель адекватна, то у цьому випадку доцільно переміститися в іншу область простору фактора.

У разі, коли область оптимуму далека, а лінійна модель не адекватна, необхідно з'ясувати причини неадекватності лінійної моделі. Ними можуть бути:

- інтервал варіювання, вибраний невдало;
- початкова модель будувалася за напівреплікою.

Потрібно побудувати напіврепліку до повного факторного експерименту, одержати роздільні оцінки для всіх коефіцієнтів регресії і зробити нове круте сходження; з реалізованих дослідів один дасть кращий результат в порівнянні з найкращим дослідом серії.

Після завершення крутого сходження ситуації розрізняються за ознакою: виявилось круте сходження ефек-

тивним чи ні. Про ефективність руху по градієнту роблять висновок за величиною параметра оптимізації. Рух по градієнту вважається ефективним, якщо реалізація уявних дослідів, розрахованих на стадії крутого сходження, приводить до поліпшення значення параметра оптимізації в порівнянні з найкращим результатом у матриці.

При ефективному крутому сходженні можливі два результати:

- область оптимуму досягнута або область оптимуму не досягнута. У разі, коли область оптимуму досягнута, експериментатор може закінчити дослідження, якщо задача полягала в досягненні області оптимуму, або продовжити дослідження, якщо задача полягала в детальному її вивченні. У разі, коли область оптимуму не досягнута, то необхідно ставити лінійний план наступного циклу і продовжувати дослідження;

- початкова модель будувалася за дробовою реплікою 2^{k-p} , де $p > 1$. У цьому випадку доцільно побудувати матрицю другої серії дослідів, змінивши всі знаки на зворотні. У разі нелінійності початкової моделі можна спробувати перетворити параметр оптимізації.

Якщо круте сходження неефективне, а положення оптимуму невизначене, то рекомендується поставити досліди в центрі експерименту з тим, щоб оцінити внесок квадратичних членів. При значущій сумі можна добудувати лінійний план до плану другого порядку, оскільки наявність квадратичних членів свідчить про близькість до майже стаціонарної області.

Головною ознакою, за якою роблять висновок про закінчення дослідження, – це значення параметра оптимізації. Якщо параметр оптимізації досяг можливої межі, тобто досяг мети, у цьому випадку необхідно провести інтерпретацію результату. Коли одержаний результат відпо-

відає початковим теоретичним уявленням про процес, то одержаний результат підтверджує правильність теорії [17].

4.11 Приклади розв'язання задач оптимізації

4.11.1 Приклад 1. Розробити склад чавунного сплаву, стійкого в умовах абразивного зношування.

Для розв'язання цієї задачі визначаються із системою легування сплаву. Нею може бути $C - Ti - Mn - Si$. Співвідношення вхідних у систему елементів приймаємо виходячи з апріорної інформації про їх вплив на стійкість металу при роботі виробу в умовах абразивного зношування. При цьому кількість вуглецю визначається з урахуванням його вмісту у зносостійких сплавах. Верхній і нижній рівні за вуглецем визначали з урахуванням літературних і патентних даних. На підставі цих даних кількість вуглецю у сплаві обмежили в межах від 2,5 до 3,5%.

Одним з елементів, що створюють найтвердіші і найстійкіші карбіди, є титан. З вуглецем титан утворює сполуку TiC з широкою областю гомогенності. Мікротвердість карбіду титану становить близько 3200 кгс/см^2 . У чавунах титан робить значний вплив як на графітизацію, так і на металеву матрицю. Наявність його у чавуні сприяє подрібненню структури і рафінуванню металу. З введенням у чавун титану понад 0,1% збільшується відпал [18, 19]. У зносостійких сплавах його зміст коливається у межах від 0,1 до 1,5% [19, 20]. З урахуванням апріорної інформації і теоретичних припущень кількість титану обмежили у межах від 4,0 до 1,0%.

Одним з важливих легуючих елементів є марганець, який сприяє перлітизації металевої матриці і розкислюванню металу. У складі білих чавунів його зміст не перевищує 1,2%. Для попередження гарячих тріщин його вводять до

складу у кількості близько 0,6%. Тому кількість марганцю обмежена у межах від 0,6 до 1,2%.

Важливим легуючим елементом є кремній, який разом з вуглецем найбільше впливає на структуру і властивості сплавів. При невеликих концентраціях він стоншує структуру, а при концентрації більше 0,78% помітно впливає на графітизацію. У чавунах з мартенситною основою вміст кремнію не повинен перевищувати 0,6%. При вмісті його у чавуні більше 3,5% в структурі з'являється графіт, при цьому зменшуються властивості міцності [19]. Тому при розробленні зносостійкого сплаву до його складу ввели кремній у кількості близько 0,7%.

При розв'язанні задачі з визначення оптимального складу здійснювали повний експеримент фактора 2^3 . За чинники x_1 , x_2 , x_3 були взяті вуглець, титан і марганець – елементи, що найефективніше впливають на підвищення зносостійкості сплавів. Як параметр оптимізації вибрали відносну зносостійкість при абразивному зношуванні. Як зразок порівняння використали метал, наплавлений порошковим дротом, який містить ітрій а.с.686214 СРСР. При плануванні експерименту використовували кодоване значення факторів +1 і -1. Для простоти запису одиниці опускаємо. Число дослідів, необхідних для реалізації всіх можливих поєднань рівнів факторів, визначаємо за формулою (4.6):

$$N = 2^K,$$

де число факторів K дорівнює 3; $N = 2^3 = 8$ (дослідів).

Вибір експериментальної області простору фактора виконуємо після аналізу апріорної інформації. У цій області вибирали підобласть для планування експериментів, для чого визначали рівень та інтервал варіювання. На основі огляду літературних і патентних джерел, а також попередньої апробації одержаного металу встановили верхню і

нижню межі вмісту елементів (рівні), що найсильніше впливають на утворення структури металу. У зв'язку з цим основний рівень був установлений:

- для вуглецю $\frac{3,5 + 2,5}{2} = 3,0$;

- для титану $\frac{4,0 + 1,0}{2} = 2,5$;

- для марганцю $\frac{1,2 + 0,6}{2} = 0,9$,

а інтервал варіювання:

- для вуглецю $3,5 - 3,0 = 0,5$;

- для титану $4,0 - 2,5 = 1,5$;

- для марганцю $1,2 - 0,9 = 0,3$.

При розв'язанні задачі дослідження залежності зносостійкості від складу сплаву математичну модель задаємо рівнянням регресії у вигляді лінійного полінома

$$y = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \theta_3 x_3 + \theta_{12} x_1 x_2 + \theta_{13} x_1 x_3 + \theta_{23} x_2 x_3 + \theta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (4.25)$$

де y – вихідний параметр; $\theta_0, \dots, \theta_3$ – коефіцієнти регресії; x_1, x_2, x_3 – фактори.

За наслідками проведених досліджень, з урахуванням встановлених верхнього і нижнього рівнів варіювання елементів, складаємо матрицю планування експериментів (табл. 4.11).

Коефіцієнти регресії математичної моделі (лінійного рівняння), що описує поверхню відгуку в локальній ділянці поблизу вибраного основного рівня, розраховували за формулою (7), звідки:

$$\theta_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad \theta_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ij}}{N}, \quad (4.26)$$

де N – кількість дослідів; x_{ij} = значення x_j в i -му досліді;

θ_j – коефіцієнт регресії i – го фактора; y – вільний член;

y_j - параметр оптимізації в i -му досліді. Тоді

Таблиця 4.11 – Матриця планування 2^3

Най- ме- ну- вання	Віль- ний член	C	Ti	Mn	CTi	CMn	TiMn	CTi Mn	ε
Осно- вний рівень		3,0	2,5	0,9					1,3
Інтер- вал варі- юван- ня		0,5	1,5	0,3					
Верх- ній рівень (+1)		3,5	4,0	1,2					
Ниж- ній рівень (-1)		2,5	1,0	0,6					
Код дослі- ду	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,4
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,7
3	+	-	+	-	-	+	-	+	1,7
4	+	+	+	-	+	-	-	-	1,6
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,73
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,75
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,54
8	+	+	+	+	+	+	+	+	1,48
	1,1125	-0,02	0,4675	0,0125	-0,06	-0,02	-0,0825	0,04	8,9

Коефіцієнти регресії математичної моделі (лінійного рівняння), що описує поверхню відгуку в локальній ділянці поблизу вибраного основного рівня, розраховували за формулою (7), звідки:

$$\epsilon_o = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad \epsilon_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (4.26)$$

де N – кількість дослідів; x_{ji} = значення x_j в i -му досліді;
 v_j – коефіцієнт регресії i – го фактора; y – вільний член;
 y_j – параметр оптимізації в i -му досліді. Тоді

$$\epsilon_o = \frac{0,4 + 0,7 + 1,7 + 1,6 + 0,73 + 0,75 + 1,54 + 1,48}{8} = 1,1125;$$

$$\epsilon_1 = \frac{-0,4 + 0,7 - 1,7 + 1,6 - 0,73 + 0,75 - 1,54 + 1,48}{8} = -0,02;$$

$$\epsilon_2 = \frac{-0,4 - 0,7 + 1,7 + 1,6 - 0,73 - 0,75 + 1,54 + 1,48}{8} = 0,4675;$$

$$\epsilon_3 = \frac{-0,4 - 0,7 - 1,7 - 1,6 + 0,73 + 0,75 + 1,54 + 1,48}{8} = 0,125;$$

$$\epsilon_4 = \frac{0,4 - 0,7 - 1,7 + 1,6 + 0,73 - 0,75 - 1,54 + 1,48}{8} = -0,06;$$

$$\epsilon_5 = \frac{0,4 - 0,7 + 1,7 - 1,6 - 0,73 + 0,75 - 1,54 + 1,48}{8} = -0,03;$$

$$\epsilon_6 = \frac{0,4 + 0,7 - 1,7 - 1,6 - 0,73 - 0,75 + 1,54 + 1,48}{8} = -0,0825;$$

$$\epsilon_7 = \frac{-0,4 + 0,7 + 1,17 - 1,6 + 0,73 - 0,75 - 1,54 + 1,48}{8} = 0,04.$$

У результаті розрахунку були одержані такі коефіцієнти регресії: $x_0 = 1,1125$; $x_1 = -0,02$; $x_2 = +0,4675$; $x_3 = +0,0125$; $x_1x_2 = -0,06$; $x_{13} = -0,03$; $x_{23} = -0,0825$; $x_{123} = +0,04$.

Для виключення помилки була вироблена рандомізація дослідів. Порядок проведення дослідів вибираємо за таблицею випадкових чисел [17]. Після розрахунку коефіцієнтів регресії і перевірки їх статистичної значущості одержане рівняння регресії, що відкриває локальну ділянку поверхні відгуку:

$$Y = \varepsilon = 1,1125 - 0,02x_1 + 0,4675x_2 + 0,0125x_3 - 0,06x_{12} - 0,03x_{13} - 0,0825x_{23} + 0,04x_{123}. \quad (4.27)$$

Перевірка статистичної значущості показала, що всі коефіцієнти значущі. Тому рівняння (4.27) можна записати у вигляді

$$Y = 1,1125 - 0,02C + 0,4675Ti + 0,0125Mn - 0,06CTi + 0,03CMn - 0,825TiMn + 0,04CTiMn. \quad (4.28)$$

Перевірка адекватності за F-критерієм Фішера (табл. 4.12) показала, що рівняння (4.28) є адекватним. Коефіцієнти полінома є частковими похідними функції відгуку за відповідними змінними. За величиною коефіцієнтів регресії встановлюємо ступінь впливу кожного з факторів на параметр оптимізації, а за знаком – характер впливу. При цьому чим більше коефіцієнти, тим сильніше вплив фактора. Знак плюс вказує, що із збільшенням значення фактора величина параметра оптимізації зростає, а знак мінус – спадає. Знаки коефіцієнтів регресії вказують напрям руху по поверхні відгуку. Коефіцієнт v_0 не впливає на розрахунок градієнта. З рівняння випливає, що зносостійкість сплаву при абразивному зношуванні зростає із збільшенням концентрації титану і зменшенням концентрації вуглецю.

Для отримання сплаву з необхідною кількістю властивостей необхідно здійснити круте сходження за невідомою поверхнею відгуку. Для цього коефіцієнти регресії множимо на інтервал варіювання відповідних змінних. За одержаними значеннями плануємо серію дослідів крутого сходження. Як «одиничний крок» вибираємо значення, зручне для шихтування елемента, що найсильніше впливає на структуру, – титану. З урахуванням вибраного «одиничного кроку» для титану визначаємо одиничні кроки для решти елементів. При визначенні напряму руху значення факторів змінювали пропорційно значенням відповідних коефіцієнтів регресії з урахуванням їх знаків. При реалізації крутого сходження (табл. 4.12) вже на першому кроці визначилося збільшення зносостійкості.

При подальшому русі по лінії крутого сходження (досліди 10, 11, 12) зносостійкість знижується. Це свідчить про те, що досягнута область екстремуму. Оптимальний склад зносостійкого сплаву буде такий (у масових відсотках): вуглець – 2,48; титан – 5,0; марганець-0,606. Виконане круте сходження виявилось ефективним, оскільки результати дослідів перевищили кращий результат дослідів матриці планування.

Описана методика і наведений приклад складають скорочений варіант планування експерименту в матеріалознавстві методом Бокса-Уїлсона при пошуку оптимальних умов проходження процесів.

Коефіцієнти регресії наведених математичних залежностей можуть бути розраховані за допомогою методу найменших квадратів за програмою, що входить у математичне забезпечення для розв'язання задач оптимізації Excel 7.0. Оцінка достовірності рівняння регресії, також виконана у програмі Excel 7.0, дозволяє прийняти гіпотезу про адекватність регресійної моделі.

Стійкість наплавленого металу в умовах абразивного зношування забезпечується утворенням мартенситної структури і карбідів вольфраму, хрому, бору, цирконію, ітрію та ін. Утворення карбідів титану в наплавленому металі є надзвичайно важким процесом через складність введення у нього титану. Розроблений наплавлений метал, що має мартенситну структуру із включеннями до 20,0% карбідів титану, забезпечує високу стійкість до абразивного зношування й відповідає конструкторським вимогам до надійності й довговічності машин і механізмів.

Таблиця 4.12 – Розрахунок крутого сходження

Найменування	C	Ti	Mn	ε
Код	x_1	x_2	x_3	y
Дослід 3	2,5	4,0	0,6	1,7
Коефіцієнти v_i	0,02	0,4675	0,0125	
Коефіцієнти j, v_i, I_i	0,5 -0,01	1,5 0,7	0,3 -0,004	
Крок при зміні x_2 на 1,0	-0,02	1,0		
Реалізований дослід 9	2,48	5,0	0,606	1,8
Нереалізовані: дослід 10	2,40	6,0	0,612	1,58
дослід 11	2,44	7,0	0,618	1,41
дослід 12	2,42	8,0	0,624	1,2

що має мартенситну структуру із включеннями до 20,0% карбідів титану, забезпечує високу стійкість до абразивного зношування й відповідає конструкторським вимогам до надійності й довговічності машин і механізмів.

Установлені закономірності впливу вуглецю, титану й марганцю на стійкість наплавленого металу до абразивного зношування дозволили розробити наплавлений метал, який утримує (мас. %): вуглецю 2,58 - 2,70, марганцю 0,58 - 0,63 і титану 5,16 - 5,24, що перевершує за стійкістю

до абразивного зношування метал, наплавлений сплавом «Сормайт - 1» в 1,8 раза.

4.11.2 Приклад 2. Розробити оптимальний склад полімерного композиційного матеріалу з бінарним наповнювачем і максимальною стійкістю до абразивного зношування.

4.11.2.1 Пошук оптимальних складів методом планування експерименту і його результати

При плануванні експерименту враховували, що невідома функція відгуку

$$Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

де x_1, x_2, \dots, x_k – фактори варіювання, апроксимується поліномом

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4.29)$$

де $\beta, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – теоретичні коефіцієнти регресії.

У результаті реалізації плану експерименту знаходили чисельні значення коефіцієнтів регресії β_i . Рівняння (4.29) набирає вигляду

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4.30)$$

де y є оцінкою і розрахунковим значенням функції відгуку. Відповідно вибіркові коефіцієнти регресії є оцінкою генеральних коефіцієнтів:

$$\beta_0 > \beta_0; \quad \beta_i > \beta_i; \quad \beta_{ij} > \beta_{ij}; \quad \beta_{ii} > \beta_{ii}.$$

Рівняння (4.30) інтерпретували як математичний опис деякої геометричної поверхні у K – вимірному просторі – поверхні відгуку.

Як функцію відгуку вибрали:

1 Відносну абразивну зносостійкість I_0/I_k ,

де I_0, I_k – питома інтенсивність зношування полімерної матриці і композита на її основі відповідно. Вона розраховувалася за формулою

$$I = \frac{\Delta V}{N \cdot L} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right],$$

де ΔV – зношений об'єм композита; N – нормальне навантаження на зразок; L – шлях тертя.

Дослідження абразивного зношування проведені за схемою вал-частковий вкладиш. На сталевому валу діаметром 90 мм і завдовжки 300 мм закріплювався абразивний папір МС 1000х505Ш, 160С16М1300 (ГОСТ 6456-68). Зразок композита діаметром $10 \pm 0,1$ мм і заввишки $15 \pm 0,1$ мм торцем прироблявся, а потім проводили два паралельні досліді за новими слідами для однієї точки плану (швидкість ковзання 0,17 м/с; шлях тертя 10,2 м, час досліді 60 с). Реалізовувалося чотири плани для нормальних навантажень на зразок $P = 20, 50, 105$ і 160 Н. Питому інтенсивність зношування розраховували відповідно до загальноприйнятої методики.

2 Міцність при розриві (руйнівне напруження при розтягуванні) σ_{pp} , МПа.

Дослідження проводили на зразках у вигляді втулки із зовнішнім діаметром $50 \pm 0,05$ мм, внутрішнім діаметром $40 \pm 0,05$ мм і заввишки $10 \pm 0,05$ мм. Машина для випробувань – машина розривна 200IP-05 ГОСТ 7762-74. Проводили п'ять паралельних дослідів.

3 Відносне подовження при розриві ϵ , %.

Дослідження проводили на тих самих зразках, що і при випробуваннях на міцність при розриві.

4 Добуток міцності при розриві на відносне подовження при цьому ($\sigma_{pp} \epsilon$), МПа (ϵ у відносних одиницях).

На першій стадії експерименту розглядалася лінійна модель, оскільки не було відомо, яким ступенем полінома можна описати результати експерименту.

При побудові лінійної моделі знаходили чисельні значення коефіцієнта ϵ_0 і лінійних коефіцієнтів ϵ_i :

$$y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^k \epsilon_i x_i . \quad (4.31)$$

Досліджений композит складався з політетрафторетилену (фторопласту-4), низькомодульного вуглецевого волокна УТМ-8 з гідратцелюлози (вміст вуглецю 70%, густина $\eta = 1500$ кг/м³, міцність волокна 0,55 ГПа, модуль пружності 30-40 ГПа, температура кінцевої термообробки 8500С) і карбїду титану з густиною 4800 кг/м³.

Вуглецеві волокна в композиції мали діаметр $10 \pm \pm 0,8$ мкм і широкий об'ємний розподіл Вейбулла по довжинах (з параметрами $a = 226$ мкм, $\Delta = 1,68$):

$$\rho(\ell) = \frac{\Delta}{a} \cdot \frac{1}{\Gamma(1 + \frac{1}{\Delta})} \cdot (\ell/a)^\Delta \exp[-(\ell/a)^\Delta],$$

де $\rho(\ell)$ – густина розподїлу, мкм⁻¹;

$\Gamma(x)$ – гамма-функція;

ℓ - довжина волокна, мкм.

Сфероїдальні частинки карбїду титану мали вузький розподїл по діаметру: менше 1 мкм – не більше 32%, основна фракція 1-2 мкм – не менше 60%, 2-3 мкм – не більше 7%, 3-5 мкм – не більше 1%.

Реалїзовували повний експеримент фактора $N=2^k=2^2=4$, де N – число дослїдів плану; $K = 2$ – число факторів. Варїювані фактори і область факторного простору наведені нижче.

	$C_1(x), \%$	$C_2(x), \%$
Інтервал варіювання	5,658	7,779
Рівень варіювання		
- 1,0	6,342	4,221
0	12,0	12,0
+ 1,0	17,658	19,779

Тут C_1 – об'ємна концентрація вуглецевого волокна;

C_2 – концентрація карбіду титану.

Матриця планування і робоча матриця наведені у табл.4.13.

Перехід від натуральних до кодованих величин факторів варіювання здійснювали за формулою

$$x_{in} = \frac{C_{in} - C_{io}}{S_i},$$

де x_{in} – кодоване значення і-го фактора n – рівня;

C_{in} - натуральне значення і-го фактора n – рівня;

C_{io} - кодоване значення і-го фактора нульового рівня;

S_i - інтервал варіювання і-го фактора.

Досліди рандомізовані у часі.

Після реалізації плану (табл. 4.13) розрахували коефіцієнти рівняння

$$y = y + v_1 x_1 + v_2 x_2.$$

Перевірка лінійного рівняння на адекватність показала, що всі рівняння не адекватні.

Оскільки лінійного наближення недостатньо для опису об'єкта дослідження з потрібною точністю, то виникла необхідність побудови моделі у вигляді полінома другого ступеня:

$$y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^k \epsilon_i x_i + \sum_{i,j=1}^k \epsilon_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^6 \epsilon_{ii} x_i^2 . \quad (4.32)$$

При числі факторів 3 корисними і дуже ефективними є ротатабельні плани другого порядку [3]. Матрицю ПФЕ використовували як «ядро» ротатабельного плану другого порядку, «зоряні» точки будували на осях координат, визначаючи величину зоряного плеча α ; при цьому береться до уваги умова ротатабельності (для «ядра» у вигляді плану ПФЕ):

$$\alpha = 2^{k/4} = 2^{2/4} = 1,414.$$

Таблиця 4.13 – Матриця планування і робоча матриця

Номер	x_1	x_2	$C_1, \%$	$C_2, \%$	Концентрація ПТФЕ, %	Густина компози- та, кг/м ³	Рецептура		
							$C_1^*,$ мас.ч.	$C_2^*,$ мас.ч.	Конце- нтрація ПТФЕ, %
1	+1	+1	17,658	19,779	62,563	2,5907	26,487	94,939	137,639
2	+1	-1	17,658	4,221	78,121	2,1861	26,487	20,261	171,866
3	-1	+1	6,342	19,779	73,879	2,6699	9,513	94,939	162,534
4	-1	-1	6,342	4,221	89,437	2,2654	9,513	20,261	196,761

Загальне число дослідів N при ротатабельному плануванні визначається із співвідношення

$N = 2^k + 2K + n_0 = n$ «ядра» + $n_\alpha + n_0$,
де n_0 – число дослідів у центрі плану;

n_α – число «зоряних» точок.

Варійовані фактори і область факторного простору наведені нижче:

	$C_1(x_1), \%$	$C_2(x_2), \%$
Інтервал варіювання	5,658	7,779
Рівень варіювання:		
-1,414	1,5	1,0
-1,0	6,342	4,221
0	12,0	12,0
+1,0	17,658	19,779
+1,414	20,0	23,0

Досліди та їх повторення були рандомізовані у часі за допомогою таблиці випадкових чисел (табл. 2.3).

Коефіцієнти рівняння регресії

$$y = v_0 + v_1 x_1 + v_2 x_2 + v_{12} x_1 x_2 + v_{11} x_1^2 + v_{22} x_2^2 \quad (4.33)$$

визначали за такими формулами [3]:

$$v_0 = \frac{2A}{N} \left[(\lambda_4^*)^2 (\kappa + 2) \sum_1^N y_n - c^* \lambda_4^* \sum_1^N \sum_1^{\kappa} x_{in} y_n \right],$$

$$v_i = \frac{\sum_1^N x_{in} y_n}{N - n_0},$$

$$v_{ij} = \frac{C_2^*}{N \lambda_4^*} \cdot \sum_1^n x_{in} \cdot x_{jn} \cdot y_n,$$

Таблиця 4.14 – Матриця планування і робоча матриця ротатбельного плану другого порядку

Номер	x ₁	x ₂	C ₁ , %	C ₂ , %	Концентрація ПТФЕ, %	Густина композита, кг/м ³	Рецептура			
							C ₁ *, мас.ч.	C ₂ *, мас.ч.	Концен- трація ПТФЕ, %	
Ядро	1	+1	+1	17,658	19,779	62,563	2,5907	26,487	94,939	137,539
	2	+1	-1	17,658	4,221	78,121	2,1861	26,487	20,261	171,866
	3	-1	+1	6,342	19,779	73,879	2,6699	9,513	94,939	162,534
	4	-1	-1	6,342	4,221	89,437	2,2654	9,513	20,261	196,761
«Зоряна область»	5	+1	0	20,0	12,0	68,0	2,3720	30,0	57,6	149,6
	6	- 1,414	0	1,5	12,0	84,0	2,4465	6,0	57,6	184,8
	7	0	+1,414	12,0	23,0	65,0	2,7140	18,0	110,4	143,0
	8	0	-1,414	12,0	1,0	87,0	2,1420	18,0	4,8	191,4
Нульова об- ласть	9	0	0	12,0	12,0	76,0	2,4280	18,0	57,6	167,2
	10	0	0	12,0	12,0	76,0	2,4280	18,0	57,6	167,2
	11	0	0	12,0	12,0	76,0	2,4280	18,0	57,6	167,2
	12	0	0	12,0	12,0	76,0	2,4280	18,0	57,6	167,2
	13	0	0	12,0	12,0	76,0	2,4280	18,0	57,6	167,2

У результаті реалізації плану одержані дані, наведені у табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Результати реалізації плану другого порядку

Номер заходу	Відносна абразивна зносостійкість $1_0/1_k$			σпл, МПа	ε, %	(σпл · ε), МПа
	P = 50 Н	P = 105 Н	P = 160 Н			
1	1,2390	1,0967	1,0776	15,63	15,32	2,395
2	1,1847	1,0271	1,2087	18,62	98,25	18,294
3	1,8726	1,7412	1,7326	17,84	84,93	15,152
4	1,4635	1,3073	1,4083	19,55	232,77	45,507
5	1,2040	1,0367	1,0595	17,90	49,51	8,862
6	1,8728	1,6184	1,9500	19,98	205,41	41,041
7	1,4520	1,2271	1,2676	16,41	23,18	3,804
8	1,1769	1,0195	1,2263	19,02	200,85	37,157
9	1,5552	1,3261	1,5015	18,50	113,86	21,064
10	1,5959	1,3146	1,4774	18,61	106,80	18,875
11	1/4322	1,3261	1,3804	18,95	118,67	22,488
12	1,6243	1,2853	1,4509	18,85	115,97	21,860
13	1,5794	1,2247	1,4075	18,38	101,39	18,635

$$\sigma_{ii} = \frac{FC^{*2}}{N} \left[(\kappa + 2)\lambda_4^* - \kappa \right] \sum_1^N x_{in}^2 y_n + \frac{AC^{*2}}{N} (1 - \lambda_4^*) \sum_1^N \sum_1^{\kappa} x_{in}^2 y_n - \frac{2AC}{N} \lambda_4^* \cdot \sum_1^N y_n,$$

$$\text{де } C^* = \frac{N}{N - n_o};$$

$$A = \frac{1}{2\lambda_4^* \left[(\kappa + 2)\lambda_4^* - \kappa \right]};$$

$$\lambda_4^* = \frac{\kappa C^*}{\kappa + 2}.$$

У результаті одержані такі рівняння регресії:

$N = 20$ H,

$$l_o / l_{\kappa} = 1,1760 - 0,2231X_1 + 0,1352X_2 - 0,602X_1X_2 - 0,0056X_1^2 - 0,1698X_2^2;$$

$N = 50$ H,

$$l_o / l_{\kappa} = 1,5578 - 0,2323X_1 + 0,1065X_2 - 0,887X_1X_2 - 0,0075X_1^2 - 0,1195X_2^2;$$

$N = 105$ H,

$$l_o / l_{\kappa} = 1,2957 - 0,2184X_1 + 0,0996X_2 - 0,0911X_1X_2 + 0,0317X_1^2 - 0,0704X_2^2;$$

$N = 160$ H,

$$l_o / l_{\kappa} = 1,4439 - 0,2642X_1 + 0,314X_2 - 0,1138X_1X_2 + 0,0245X_1^2 - 0,0444X_2^2;$$

$$\sigma_{pp} = 18,6625 - 0,7601X_1 - 1,0488X_2 - 0,32X_1X_2 + 0,0184X_1^2 - 0,5939X_2^2;$$

$$\varepsilon = 111,3667 - 53,0715X_1 - 60,2994X_2 + 16,2275X_1X_2 + 4,9654X_1^2 - 2,7548X_2^2;$$

$$\sigma_{pp} \cdot \varepsilon = 20,7899 - 10,6839X_1 - 11,6769X_2 + 3,6140X_1X_2 + 1,4668X_1^2 - 0,768X_2^2.$$

За нульовою областю дисперсія відтворюваності обчислюється за формулою

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (y_{oi} - \bar{y}_o)^2}{n_o - 1},$$

де Y_{oi} - результат окремого дослід у нульовій точці;

\bar{y}_o - середнє арифметичне дослідів у нульовій точці;

n_o - число дослідів у нульовій точці.

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії з 95% довірчою вірогідністю проводилася виходячи з припущення, що величина коефіцієнта більше від довірчого інтервалу, визначуваного співвідношенням [1]:

$$v_i - 2,18S_{\{B_i\}} \leq \beta_i \leq v_i + 2,18S_{\{B_i\}},$$

тут 2,18 – значення t-критерію при довірчій вірогідності 95% і числі дослідів $N = 13$;

$S_{\{B_i\}}^2$ - дисперсія, пов'язана з помилками у визначенні коефіцієнтів регресії, визначувана за такою формулою:

$$S_{\{e_o\}}^2 = \frac{2A\lambda_4^*(\kappa + 2)}{N} S_{\{\bar{y}\}}^2,$$

$$S_{\{e_i\}}^2 = \frac{S_{\{y\}}^2}{N - n_o},$$

$$S_{\{e_{ij}\}}^2 = \frac{AC^2[(\kappa + 1)\lambda_4^* - (\kappa - 1)]}{N} \cdot S_{\{y\}}^2.$$

Після розрахунку довірчих інтервалів і відкидання незначущих коефіцієнтів одержані рівняння перевіряли на адекватність за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{y\}}^2},$$

де $S_{ад}^2$ - дисперсія адекватності, що визначається за формулою

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N (y_n - y_n)^2 - \sum_1^{n_0} (y_{on} - \bar{y}_o)^2}{N - \theta - (n_0 - 1)},$$

де y_n - результати окремих дослідів, включаючи і повторення в нульовій точці;

f_n - розрахункове значення функції відгуку в n-й точці;

θ - число коефіцієнтів (включаючи і v_0) рівняння, що перевіряється на адекватність.

Перевірка показала, що одержані результати адекватно $\{F_T(f_{ад} = 4; f_{\bar{y}} = 4; j = 0,05) = 6,39\}$ описуються такими рівняннями:

$N = 20$ Н,

$$I_0 / I_k = 1,7560 - 0,2231X_1 + 0,1352X_2 - 0,0602X_1X_2 - 0,1698X_2^2 \\ \{F_p = 0,09; S_y^2 = 0,035\};$$

$N = 50$ Н,

$$I_0 / I_k = 1,5578 - 0,2323X_1 + 0,1065X_2 - 0,887X_1X_2 - 0,1195X_2^2 \\ \{F_p = 0,07; S_y^2 = 0,0055\};$$

$N = 105$ Н

$$1_0/1_\kappa = 1,2957 - 0,2184X_1 + 0,0996X_2 - 0,0911X_1X_2 - 0,0704X_2^2$$

$$\{F_p = 3,97; S_y^2 = 0,0018\};$$

N = 160 H,

$$1_0/1_\kappa = 1,4439 - 0,2642X_1 + 0,0314X_2 - 0,1138X_1X_2 - 0,0444X_2^2$$

$$\{F_p = 3,22; S_y^2 = 0,0025\};$$

$$\sigma_{pp} = 18,6625 - 0,7601X_1 - 1,0488X_2 - 0,32X_1X_2 - 0,5939X_2^2$$

$$\{F_p = 2,21; S_y^2 = 0,125\};$$

$$\varepsilon = 111,3667 - 53,0715X_1 - 60,2994X_2 + 16,2275X_1X_2 + 4,9654X_1^2$$

$$\{F_p = 2,61; S_e^2 = 5,475\};$$

$$\sigma_{pp} \cdot \varepsilon = 20,7899 - 10,6839X_1 - 11,6769X_2 + 3,6140X_1X_2 +$$

$$+ 1,4668X_1^2 - 0,768X_2^2;$$

$$\{F_p = 2,29; S_y^2 = 5,475\};$$

де F_p , F_t – значення критерію Фішера розрахункове і табличне відповідно;

$f_{ад}$, $f_{\bar{y}}$ - число ступенів вільності дисперсії адекватності і відтворюваності;

j – рівень значущості (рівень ризику) при оцінці адекватності рівняння відповідно до [3].

4.11.3 Приклад 3. Розробити наплавлений метал, ідентичний високоміцному чавуну.

На підставі літературного огляду, теоретичних досліджень і проведених експериментів встановлено, що для одержання в наплавленому металі високоміцного чавуну з глобулярним графітом необхідно, щоб у ньому засвоїлися вуглець, кремній і кальцій.

Виходячи з термодинамічного аналізу, можна сказати, що застосування чистого кальцію при формоутворенні наплавленого металу практично неможливо. Це пов'язане з більшою спорідненістю кальцію з киснем, у результаті чого відбувається швидке його окислювання. Тому кальцій необхідно застосовувати у вигляді його сполук, які були б стійкими у нормальних умовах повітряного середовища й не були б гідроскопічними або піддавалися впливу вологи.

Проведені експерименти щодо засвоєння у наплавленому металі чистих рідкоземельних металів, їх солей, а також оксидів показали, що використання їх як глобуляризаторів недоцільно або неможливо з різних причин [22 - 25]. Тому як глобуляризатор графіту був обраний кальцій у складі феросилікокальцію, одночасно вводиться й кремній, чим обмежується кількість кальцію. Щоб збільшити міцність наплавленого металу й сприяти утворенню глобулярного графіту, додатково включено до складу порошкового дроту кальцій, що входить до складу плавикового шпату. Тому для одержання у наплавленому металі необхідної кількості вуглецю, кремнію й кальцію до складу порошкового дроту включили такі інгредієнти: графіт, феросилікокальцій і плавиковий шпат.

У результаті проведених попередніх досліджень встановлено, що при введенні до складу порошкових дротів графіту, феросилікокальцію й плавикового шпату, що містять у своїй сполуці вуглець, кремній і кальцій, коефіцієнт їх переходу у наплавлений метал буде становити для

вуглецю 0,5; кремнію - 0,7 і кальцію - 0,025. Для виготовлення порошкових дротів були обрані такі інгредієнти, що містять вуглець, кальцій і кремній: графіт електродний ГЕІ - 1 (ДЕРЖСТАНДАРТ 17022-81), плавиковий шпат (ДЕРЖСТАНДАРТ 7618-83), феросилікокальцій (ДЕРЖСТАНДАРТ 4762-77Е), стрічка сталеві Ст08кп ОМ 2 0,6x15 ДЕРЖСТАНДАРТ 503-81. Введення до складу шихти електродного графіту забезпечує гарне його засвоєння у зварювальній ванні при максимальному переході вуглецю у розплавлений метал. Кількість вуглецю у наплавленому металі обмежували в межах 2,1 - 3,5%. Така кількість вуглецю у наплавленому металі достатня для одержання доєвтектичного чавуну. Кремній у складі наплавленого металу засвоювався з уведеного до складу порошкового дроту феросилікокальцію. Кількість кремнію у наплавленому металі обмежували по нижньому й верхньому рівнях від 2,0 до 3,0%. Вміст у цих межах кремнію у наплавленому металі забезпечує високу міцність високоміцного чавуну. Збільшення або зменшення відсоткового вмісту кремнію у наплавленні спричиняє зниження міцності. Тому доцільно обмежуватися встановленими межами. Для обмеження кремнію по верхній межі й збільшення кількості кальцію до складу порошкового дроту вводять, крім феросилікокальцію, плавиковий шпат. Збільшення кількості феросилікокальцію у складі шихти спричинило б збільшення у наплавленому металі кальцію, але в той же час підвищився б і відсотковий вміст кремнію. Якщо збільшення кальцію спричиняє корисну дію на глобуляризацію графіту, то підвищення кількості кремнію сприяло б утворенню силікофериту й відповідно зниженню міцності наплавленого металу. Тому введення до складу шихти плавикового шпату дозволило зменшити кількість кремнію при переході його з феросилікокальцію. Введення до складу порошкового дроту кальцію, крім його глобуляризуючої дії, доцільно так

само, як і гарного стабілізатора дугового процесу. Кількість кальцію у наплавленому металі обмежили в межах від 0,02 до 0,05%.

Застосовуючи математичний метод планування експерименту $N = 2^3$, визначали оптимальну сполуку наплавленого металу. За фактори X_1 , X_2 , X_3 обрані вуглець, кальцій і кремній. Як параметр оптимізації Y прийнятий тимчасовий опір при розтяганні (σ_6). Число дослідів, необхідних для реалізації всіх можливих сполучень рівнянь факторів, визначали за формулою 4.6. На основі раніше обґрунтованих верхніх і нижніх меж (рівнів) вуглецю, кальцію й кремнію визначали основний рівень, що становив відповідно 2,8, 0,03, і 2,5. Інтервал варіювання для вуглецю становив 0,7, для кальцію - 0,01, а для кремнію - 0,5. При вирішенні завдання дослідження залежності кількості включень глобулярного графіту в наплавленому металі від сполуки порошкового дроту математичну модель задано рівнянням регресії виду лінійного полінома (4.25).

За результатами проведених досліджень із урахуванням установлених верхньої й нижньої меж рівнів варіювання елементів склали матрицю планування експериментів (табл.4.16).

Коефіцієнти регресії математичної моделі, що описує поверхню відгуку в локальній ділянці поблизу обраного основного рівня, розрахували за формулами (4.26). У результаті розрахунку були отримані такі коефіцієнти регресії:

$$B_0 = 381,25; B_1 = 16,25; B_2 = 51,25; B_3 = 1,25; B_4 = -31,25; B_5 = -8,75; B_6 = -3,75; B_7 = 8,75.$$

Для уникнення помилки була зроблена рандомізація дослідів. Порядок проведення дослідів вибирали за таблицею випадкових чисел (табл.2.3).

Таблиця 4.16 – Матриця планування експерименту $N = 2^3$

Найменування	Вільний член	C	Ca	Si	CCa	CSi	CaSi	CCaSi	Часовий опір при розтягуванні σ_{σ}
Основний рівень		2,8	0,035	2,5					400
Інтервал варіювання		0,7	0,015	0,5					
Верхній рівень (+1)		3,5	0,05	3,0					
Нижній рівень (-1)		2,1	0,02	2,0					
Код досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1 X_2	X_1 X_3	X_2 X_3	X_1 X_2 X_3	у
1	+	-	-	-	+	+	+		320
2	+	+	-	-	-	-	+	+	320
3	+	-	+	-	-	+	-	+	380
4	+	+		-	+	-	-	-	490
5	+	-	-	+	+	-	-	+	360
6	+	+	-	+	-	+	-	-	310
7	+	-	+	+	-	-	+	-	390
8	+	+	+	+	+	+	+	+	470

Після розрахунку коефіцієнтів регресії й перевірки їх статичної значущості отримане рівняння регресії, що описує локальну ділянку поверхні відгуку:

$$Y = \sigma_{\sigma} = 381,25 + 16,25C + 51,25Ca + 1,25Si + 31,25CCa - 8,75CSi - 3,75CaSi + 8,75CCaSi. \quad (4.34)$$

Перевірка адекватності за критерієм Фішера F (4.17) показала, що рівняння (4.34) є адекватним. Коефіцієнти полінома є частинними похідними функціями відгуку за відповідними змінними. За величиною коефіцієнтів регресії встановлюємо ступінь впливу кожного з факторів на параметр оптимізації, а за знаком – характер впливу. Знаки коефіцієнтів регресії вказують напрямок руху по поверхні відгуку. Коефіцієнт B_0 не впливає на розрахунок градієнта. Рівняння (4.34) показує, що тимчасовий опір при розтяганні у наплавленому металі зростає зі збільшенням концентрації кальцію. За коефіцієнтами рівняння розраховували напрям руху до області оптимуму за самим коротким шляхом. Для цього виконували круте сходження по невідомій поверхні. За отриманим значенням намічали серію дослідів крутого сходження. За «одиничний крок» вибрали значення, зручне для шихтування найбільше, що сильно впливає на структуру елемента - кальцію. З урахуванням обраного «одиничного кроку» для кальцію визначали одиничні кроки для інших елементів. При визначенні напрямку руху значення факторів змінювали пропорційно значенням відповідних коефіцієнтів регресії з урахуванням їх знаків. При реалізації крутого сходження вже на першому кроці (дослід 9) одержали найбільше значення тимчасового опору при розтяганні, що становило 510 МПа (табл. 4.17). Для порівняння у сплавів 4 і 8, що мають найвищий тимчасовий опір при розтяганні із всіх сплавів матриці планування, воно становить відповідно 470 і 490 МПа. При подальшому просуванні по крутому сходженню (досліди 10 і 11) тимчасовий опір при розтяганні не збільшується. Це свідчить про те, що досягнуто область екстремуму. Оптимальна сполука наплавленого металу така (мас.%): вуглець – 3,6; кремній – 2,0055; кальцій – 0,0445 [26,27]. Виконане круте сходження виявилось ефективним, тому що резуль-

тати досліджуваного перевищили кращий дослід матриці планування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 - Розрахунок крутого сходження

Найменування	C	Ca	Si	σ_B
Код	X ₁	X ₂	X ₃	Y
Дослід 4	3,5	0,05	2,0	490
Коефіцієнти B	16,25	51,25	1,25	
Інтервал варіювання X ₁	0,7	0,01	0,5	
B _i x X _i	11,375	0,5125	0,625	
Крок і	0,1	0,0045	0,0055	
Реалізований дослід 9	3,6	0,0545	2,0055	510
Реалізований дослід 10	3,7	0,059	2,011	480
Реалізований дослід 11	3,8	0,0635	2,0165	460

Металографічними дослідженнями визначено, що розроблений наплавлений метал має глобулярну форму графіту ЩГд45 з кількістю включень до 10,0 % (ЩГ10). [26,27].

У результаті виконаної роботи встановлено, що одержуваний у цей час наплавлений метал при заварці дефектів на виливках з високоміцного чавуну існуючими порошковими дротами не завжди за структурою й властивостями ідентичний основному, крім того, він має у своїй сполуці дефіцитні й дорогі глобуляризуючі елементи – ітрій, церій, лантан та ін., що значно підвищує його вартість. Виявлені закономірності переходу досліджуваних елементів зі зварювальних матеріалів у наплавлений метал дозволили правильно вибрати необхідні інгредієнти для шихти порошкового дроту графіту, феросилікокальцій і плавиковий шпат, що містять у своїй сполуці недефіцитні й дорогі елементи – вуглець, кремній і кальцій, що сприяють

утворенню наплавленого металу, який має тимчасовий опір при розтяганні $\sigma_g = 510$ Мпа, і глобулярну форму графіту.

Всі обчислення за наведеними вище формулами проводилися за програмою на ПЕВМ [21].

Електронна версія програми знаходиться на кафедрі ПМ і ТКМ СумДУ.

Питання тестового контролю до СРС

1. На які запитання дає експериментаторові відповіді теорія експерименту?
2. Що є основою теорії експерименту?
3. Як поділяються експерименти за структурою?
4. На які експерименти поділяють наукові дослідження за стадіями?
5. Які експерименти відносять до лабораторних?
6. У яких випадках проводять стендові дослідження?
7. Коли необхідно проводити промисловий експеримент?
8. На які класи поділяють експерименти за знаходженням моделі об'єкта?
9. Яке розходження мають експерименти за способом проведення?
10. На чому базується пасивний експеримент?
11. Яким чином проводиться активний експеримент?
12. Чим характеризується активно-пасивний експеримент?
13. Що є метою експерименту?
14. На які класи поділяють показники якості об'єкта?
15. Що розуміється під одиничним показником якості?
16. До яких показників ставиться комплексний показник якості продукції?

17. За якими даними оцінюють якість складного об'єкта?
18. Що є метою теоретичних досліджень?
19. Який спосіб дослідження називається дедуктивним?
20. Який спосіб дослідження називається індуктивним?
21. Що таке аналіз у науковому дослідженні?
22. У чому полягає синтез у науковому дослідженні?
23. У чому полягає спосіб ранжирування в наукових дослідженнях?
24. З якою метою в наукових дослідженнях застосовують спосіб абстрагування?
25. У чому полягає суть способу формалізації у наукових дослідженнях?
26. Які методи застосовуються в теоретичних дослідженнях?
27. На чому ґрунтується гіпотетичний метод досліджень?
28. На чому ґрунтується аксометричний метод досліджень?
29. Що дозволяє досліджувати історичний метод і з якою метою?
30. Що лежить в основі експериментальних досліджень?
31. Які бувають експерименти?
32. Чим характерні природні експерименти?
33. У яких випадках застосовують штучний експеримент?
34. Як поділяються експериментальні дослідження?
35. Що дозволяють лабораторні дослідження?
36. Яку мету мають виробничі експериментальні дослідження?
37. Що містить у собі методологія експерименту?
38. Що становить основу плану-програми експерименту?

39. Що є одним з найбільш важливих етапів експерименту?
40. З якою метою роблять вибір факторів, що варіюють?
41. На яких законах повинні базуватися методи вимірів?
42. У якому документі докладно проектується процес проведення експерименту?
43. Скільки може бути випадків проведення експериментів?
44. Які класи статистичних методів вимірів застосовуються в наукових дослідженнях?
45. Що таке похибка вимірів?
46. Що показує вірогідність вимірів?
47. У ряді яких причин виникають похибки при вимірах?
48. Як класифікуються похибки при експериментах?
49. На які групи поділяються систематичні похибки?
50. На чому ґрунтується аналіз випадкових похибок?
51. Що називається достовірним інтервалом значень при вимірах?
52. Яка послідовність прийнята для обчислення мінімальної кількості вимірів?
53. Які матеріали необхідні для проведення експериментальних робіт?
54. Що є обов'язковою вимогою для проведення експерименту?
55. На які класи розбиті вимірювальні перетворювачі?
56. Яке призначення мають шкальні засоби вимірів?
57. Яке призначення індуктивних приладів?
58. З якою метою застосовуються при дослідженнях оптико-механічні й оптичні прилади?
59. У яких випадках необхідно застосовувати для виміру акустичні прилади?

60. На які види поділяються електричні контактні термометри?
61. Який матеріал застосовують для термоелектродів?
62. Які є види приймачів теплового випромінювання?
63. На які основні типи підрозділяються термоіндикатори?
64. Які умови необхідні для оцінки зносостійкості пари тертя?
65. На чому базуються неруйнівні методи визначення механічних властивостей і структури?
66. На чому базується акустичні методи контролю?
67. Як класифікуються методи визначення залишкових напружень по довжині силового поля?
68. Що таке планування експерименту?
69. У яких випадках застосовується планування експерименту?
70. Що являє собою математична модель?
71. Чим є параметр оптимізації при математичному методі планування експерименту?
72. Що називають фактором?
73. Що означає сумісність факторів?
74. Що називають факторним простором?
75. Яка математична модель називається адекватною?
76. Який напрямок називається напрямком градієнта?
77. Які типи обмежень ураховуються при виборі області експерименту?
78. Що називають інтервалом варіювання факторів?
79. Що називається повним факторним експериментом?
80. Які властивості повного факторного експерименту?
81. Яким чином визначають верхній і нижній рівні варіювання?
82. Що свідчить про силу впливу факторів?
83. За якою формулою визначаються коефіцієнти лінійної моделі?

84. Яким чином визначають дисперсію адекватності?
85. За якою формулою визначають число ступенів вільності?
86. Що називають залишковою дисперсією?
87. Як формулюється правило побудови дробового факторного експерименту?
88. Яким чином визначають значущість коефіцієнтів лінійного рівняння?
89. Що називається крутим сходженням?
90. Яка головна ознака, за якою роблять висновок про закінчення дослідження?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. – К.: Техника, 1984. -200 с.
2. Грушко И.М., Сиденко В.М. Основы научных исследований. – Харьков: Вища школа, 1983. -224 с.
3. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975. -168 с.
4. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1972. -336 с.
5. Справочник по производственному контролю в машиностроении / Под ред. А.Я. Кутая. – Л.: Машиностроение, 1974. -975 с.
6. Волосов С.С., Педь Е.И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 335 с.
7. Заситрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров. – М.: Машиностроение, 1981. - 175 с.
8. Скрибанов Е.В., Братенков А.А., Гришин М.П., Никонов А.С. Устройство для бесконтактного контроля размеров деталей на основе линейного формирования видеосигналов //Измерит. техника. -1981. -№ 6. – С.20-22.
9. Приборы для неразрушающего метода контроля и изделий: Справочник /Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1976. –Кн.1. -391 с.
10. Приборы и методы физического металловедения. /Перевод с англ.; Под ред. Ф.Вайнберга. – М.: Мир, 1973. – 428 с.

11. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. -279 с.
12. Электрические измерения неэлектрических величин /Под ред. П.В.Новицкого. -Л.: Энергия, 1975. -576 с.
13. Абрамович Б.Г., Картавцев В.Ф. Цветовые индикаторы температуры. -М.: Энергия, 1978. -214 с.
14. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. – М.: Металлургия, 1978. -302 с.
15. Испытательная техника: Справочник / Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1982. –Кн.1. -582 с.
16. Технологические остаточные напряжения /Под ред. А.В.Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. -216 с.
17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. -279 с.
18. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением /Под ред. акад. Б.Е.Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
19. Ксендзык Г.В. Применение износостойких чугунов для наплавки стальных деталей. -Киев: Техника,1968.-80 с.
20. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение, 1968. -188 с.
21. Программа для ПЭВМ. ФАСТОР. Расчет коэффициентов регрессии (для случая до 4 факторов), расчет дисперсий опыта и оценок коэффициентов регрессии, доверительных интервалов, проверка значимости коэффициентов регрессии, анализ эффективности крутого восхода и расчет новых центральных точек. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2006.
22. Любич А.И., Сытник Н.М., Аникин А.А. Влияние итрия на структуру чугуна, наплавленного порошковой проволокой // Сварочное производство. – 1983. - №6. - С.4 -5.

23. Форма графитовых включений в наплавленном металле, модифицированном иттрием /А.И.Любич, Н.М. Сытник, А.А.Аникин и др.//Сварочное производство. – 1985.-№2.-С.34-36.

24. Заварка отливок из высокопрочного чугуна порошковой проволокой, содержащей окислы редкоземельных металлов /Н.М. Сытник, Ю.Ф.Гарцунов, А.И. Любич и др. //Литейное производство.-1980.-№8.- С.20-21.

25. А.с.742087 СССР, МКИ В 23К 3/368. Состав порошковой проволоки /Н.М. Сытник, А.И. Любич, Ю.Ф. Гарцунов и др. (СССР). - №2555374/25-27; Заявлено 19.12.77; Оpubл. 25.06.80, Бюл. № 23. – 3с.

26. А.с. 733934 СССР, МКИ² В 23К 3/368. Состав порошковой проволоки / А.И. Любич, Н.М. Сытник, Ю.Ф. Гарцунов и др. (СССР). - №2539947/25-27; Заявлено 01.11.77; Оpubл. 15.05.80, Бюл. №18. – 3с.

27. Любич А.И. Исследование влияния кальция на глобуляризацию графита в наплавленном металле // Вісник СумДУ. – 1998. - №2 (10). – С.90-92.

Навчальне видання

Любич Олександр Йосипович
Будник Анатолій Федорович

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки А.Ф. Будника
Редактор С.М. Симоненко
Комп'ютерне верстання А.С. Кравченко

Підп. до друку 30.01.2009.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman Суг.Друк офс.

Ум. друк. арк. 10,70.

Обл.-вид.арк. 8,94.

Тираж 300 пр.

Вид. № 320.

Зам. №

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті
40007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру ДК № 3062 від 17.12.2007.

Надруковано у друкарні СумДУ

40007, Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.