

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

## **ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ І ВИПРОБУВАНЬ**

Конспект лекцій для студентів зварювального факультету спеціальності  
7.05050403, 8.05050403 «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і  
конструкцій»

Київ 2013

Основи вимірювань і випробувань. Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.05050403, 8.05050403 «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» / Укладачі: С. М. Гетманець, Д. В. Степанов – К.: НТУУ «КПІ», 2013. 41 –с.

*Гриф надано Вченою радою ЗФ НТУУ «КПІ»*

*(Протокол № 9 від 21.05.2013р.)*

Навчальне видання

## **ОСНОВИ ВИМІРЮВАНЬ І ВИПРОБУВАНЬ**

Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.05050403, 8.05050403  
«Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій»

Укладачі: *Сергій Михайлович Гетманець, к.т.н., доцент*

*Денис Володимирович Степанов, асистент*

Відповідальний

редактор

*В.Д. Кузнецов, д.т.н., професор*

Рецензент

*Л.А. Жданов, к.т.н., доцент*

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальні відомості про виміри і вимірювальну техніку.....	6
1.1. Основні поняття і визначення .....	6
1.2. Види і методи вимірювань.....	7
1.3. Похибки вимірювань.....	9
1.4. Обробка результатів вимірювань.....	11
1.5. Оцінка випадкових похибок прямого вимірювання.....	13
1.6. Оцінка випадкових похибок опосередкованого вимірювання ..	15
1.7. Оцінка випадкових похибок сукупних і сумісних вимірювання.	16
1.8. Класи точності засобів вимірювання.....	20
1.9. Статичні і динамічні характеристики.....	21
2. Вимірювання температур.....	26
2.1. Температура і температурні шкали.....	26
2.2.1. Теоретичні основи термопар.....	28
2.2.2. Стандартні промислові термопари.....	31
3. Методи визначення механічних властивостей зварних з'єднань.....	34
3.1. Види випробувань і область застосування.....	34
3.2. Відбір зразків.....	34
3.3. Випробування металу різних ділянок зварного з'єднання на статичне розтягування.....	37
3.4. Вимірювання твердості металу різних ділянок зварного з'єднання і наплавленого металу.....	39

## ВСТУП

Розвиток зварювальної науки і техніки органічно пов'язаний з використанням засобів вимірювання та випробувань, які є одними з способів пізнання процесів зварювання і споріднених технологій.

Вимірювання і випробування мають велике значення як засоби контролю технологічних процесів у зварювальному виробництві, що забезпечують точність, надійність, економічність і зручність ведення виробничих процесів та надають можливість їх автоматизації.

Крім того, застосування контрольно-вимірювальних приладів забезпечує можливість здійснення безпечного і безаварійного виробничого процесу та роботи технологічного обладнання.

На сьогоднішній день зварювальне виробництво використовує велику кількість засобів вимірювання – від найпростіших первинних перетворювачів і приладів до складних автоматичних пристроїв та систем, що дозволяють контролювати технологічне обладнання і складні виробництва з застосуванням інформаційно-обчислювальної техніки.

Велика кількість засобів вимірювання та випробувань вимагає їх раціонального вибору для вирішення певних виробничих або технологічних завдань.

У зв'язку з цим питання метрологічного забезпечення процесів зварювання і суміжних технологій має важливе значення з точки зору забезпечення високої якості продукції та ефективності зварювального виробництва.

Науково-технічний прогрес, створення і впровадження нових технологій ставлять нові завдання перед розвитком техніки вимірювань та випробувань. Це обумовлює необхідність подальшого удосконалення методів і засобів вимірювання та вимірювань, підвищення їх точності і надійності.

Для уніфікації засобів вимірювання та умов їх експлуатації створена і діє Державний реєстр засобів вимірювання, яка дозволяє максимально стандартизувати вимірювальні засоби для промислового застосування.

У сучасному розумінні метрологія це наука про виміри та випробування, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності. До основних напрямків метрології відносяться – загальна теорія вимірів, одиниці фізичних величин і їх системи, методи і засоби вимірювань, методи визначення точності вимірів, основи забезпечення єдності вимірів і однаковості засобів виміру, еталони і зразкові засоби вимірів та ін.

Частина з цих напрямків мають науковий характер. Інша частина відноситься до законодавчої метрології, яка обумовлює стандартизацію термінів та визначень метрології.

Сьогодні у сучасному суспільстві поряд з індустрією матеріальних цінностей все більш питому вагу займає індустрія інформації, тобто одержання, обробка, збереження і застосування відомостей різноманітного характеру. Знання потрібні людині для прийняття правильних рішень, спрямованих на досягнення поставлених цілей. Значну частину знань про властивості навколишнього світу ми одержуємо за допомогою вимірювальних засобів.

Вимірювання і випробування є сполучною ланкою між властивостями реальних об'єктів, явищ і представленнями про них, тобто нашими знаннями. Висока технологічна цивілізація неможлива без точних вимірів і випробувань, що активно впроваджуються в усі сфери людської діяльності.

Засоби вимірювань і випробувань постійно удосконалюються, а діапазон задач, які вирішуються за їх допомогою, постійно розширюється. Необхідної ефективності застосування вимірювальної техніки можна досягти тільки при грамотній її експлуатації, що має на увазі забезпечення порівнянності вимірів, вміння оцінити точність засобу вимірів і методики виконання вимірювання.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИМІРИ І ВИМІРЮВАЛЬНУ ТЕХНІКУ

## 1.1. Основні поняття і визначення

*Вимірювання* – визначення значення деякої фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

*Засоби вимірювань* – це технічні засоби, що мають нормовані метрологічні характеристики. При цьому значення фізичної величини, яке відраховують по шкалі засобу вимірювання, точно відповідає певній кількості фізичних одиниць, що прийняті у якості одиниць виміру.

До засобів вимірювання відносять – міри, вимірювальні прилади, перетворювачі і системи, вимірювальні установки і комплекси. Міра – це еталонний засіб вимірювання, який призначений для відтворення фізичної величині заданого заданого розміру або кількості.

*Міри* можуть бути однозначними та багатозначними. Так, наприклад, у електротехнічних вимірах до однозначних мір відносять котушки індуктивності, опору, нормальні елементи та ін. До багатозначних – магазини опору, конденсатори змінної ємності, калібратори напруги і струму та ін.

*Вимірювальний прилад* – це засіб виміру, який призначений для видачі кількісної інформації про величину, що вимірюють, у доступній для сприйняття формі. По способу відліку значень величини, яка вимірюється, вимірювальні прилади поділяють на аналогові і цифрові.

У аналогових вимірювальних приладах значення величини, що вимірюють, визначають безпосередньо по шкалі зі стрілкою або іншими вказівниками. У цифрових вимірювальних приладах значення величини, що вимірюють, визначають по цифровому індикатору приладу.

Вимірювальні прилади поділяють на прилади, що показують і реєструють. Показуючі прилади призначені для відліку результатів вимір у аналоговій або цифровій формі. Реєструючі прилади – для реєстрації (запису або друку) результатів вимірювання.

*Вимірювальний перетворювач* – це засіб вимірювання, призначений для створення сигналу вимірювальної інформації у формі зручної для передачі, подальшого перетворення, обробки і зберігання. Сигнал від вимірювального перетворювача не призначений для безпосереднього сприйняття оператором. До вимірювальних перетворювачів відносяться датчики (сенсори), нормуючі і масштабуючі пристрої, підсилювачі та ін.

*Датчик* – це первинний вимірювальний перетворювач, призначений для безпосереднього сприйняття дії вимірювальної величини.

По своєму метрологічному призначенню засоби вимірювань поділяють на еталонні, зразкові і робочі.

*Робочі засоби вимірювань* використовують для повсякденних вимірювань у промислових і лабораторних умовах, не пов'язаних на практиці з передачею вимірювальних мір.

*Зразкові засоби вимірювань* призначені для передачі вимірювальних мір від еталонів до робочих засобів вимірювання, тобто використовуються для їх повірки.

*Еталон* – це засіб вимірювання, який забезпечує відтворення і зберігання одиниці фізичної величини для передачі її розміру засобам вимірювання більш низького рангу, ніж вказано вище.

Вимірювальні прилади можна класифікувати за принципом дії, по способу представлення інформації і функціональному призначенню. За принципом дії засоби вимірювання поділяють на засоби прямої дії і автоматичні.

По способу представлення інформації засоби вимірювання поділяються на аналогові і цифрові, по функціональному призначенню – на засоби вимірювання, що показують і реєструють, інтегруючі, сигналізуючі та з дистанційною передачею величин, що вимірюють.

Важливим аспектом в системах вимірювання є уніфікація вхідних і вихідних сигналів елементів, що входять в систему. Це дозволяє забезпечити взаємозамінність елементів вимірювальних пристроїв і скоротити їх різновиди, а також використовувати обчислювальні комплекси у системах вимірювання.

Створення уніфікованих та стандартизованих засобів вимірювання згідно вимог Державної системи промислових приладів передбачає блочно-модульний принцип з трьома гілками, що об'єднують прилади з пневматичними, електричними і частотними сигналами.

Пневматичні прилади повинні мати рівні вхідного і вихідного сигналів 0,02 – 0,1 МПа, електричні прилади з сигналами постійного струму – 0 -5 мА, 4 – 20 мА, 0 – 10В, з частотними сигналами змінного струму – 1500 – 2500 Гц, 4000- 8000 Гц.

## **1.2. Види і методи вимірювань**

Залежно від відсутності або наявності у процедурі вимірювань перетворення роду вимірюваної фізична величини та обчислення її значення за відомими залежностями вимірювання класифікують на прямі та непрямі.

*Пряме вимірювання* – це вимір однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду та використання відомих залежностей. При всіх інших однакових умовах прямі виміри найбільш точні.

*Непряме вимірювання* – це вимір, у якому значення однієї або декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що

вимірюють прямо. Непрямі виміри ділять на опосередковані, сукупні та сумісні.

*Опосередковане вимірювання* – це непрямий вимір однієї величини з перетворенням її роду або обчислення за результатами вимірів інших величин, з якими величина, що вимірюють, пов'язана явною функціональною залежністю. Для опосередкованих вимірювань характерним є перетворення, яке здійснюють шляхом фізичного або чисельного вимірювального перетворення.

Наприклад, при опосередкованих вимірах потужності постійного струму її визначають на основі прямих вимірювань струму і напруги за формулою

$$P=U*I$$

або фізичного перетворення добутку  $U*I$  в іншу фізичну величину.

При автоматичних опосередкованих вимірюваннях прямі виміри вхідних величин і числові перетворення результатів вимірів з метою знаходження значення величини, що вимірюють, здійснюються самим засобом вимірювання.

*Сукупне вимірювання* – це непрямий вимір, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують шляхом розв'язання рівнянь, що пов'язують різні сполучення цих величин. Значення сполучень величин вимірюють прямо або опосередковано.

Метою сукупних вимірювань є знаходження шляхом числових вимірювальних перетворень значень декількох фізичних величин за неможливістю їх окремого прямого вимірювання. При цьому завдяки усередненню інколи досягають і зменшення випадкової похибки вимірювання.

Прикладом сукупних вимірювань може бути вимір опору кожного з двох резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ , що з'єднані послідовно і паралельно. В результаті прямого вимірювання омметром послідовно з'єднаних опорів маємо

$$R_{\text{пос}} = R_1 + R_2,$$

Сумарна електропровідність паралельно з'єднаних резисторів становить

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

З системи рівнянь знаходимо значення сукупно виміряних опорів  $R_1$  і  $R_2$ .

*Сумісне вимірювання* – це непрямий вимір, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюють прямо чи опосередковано.

Сумісні виміри є різновидом вимірювання залежностей. За призначенням вимірювань для незмінних чи змінних у часі вимірюваних величин їх класифікують на статичні та динамічні вимірювання.



*Статичне вимірювання* – це вимір величини, яку можна вважати незмінною за час вимірювання, тобто коли похибкою, що виникає від зміни величини під час вимірювання, можна знехтувати.

*Динамічне вимірювання* – це вимір величини, що змінюється за час вимірювання настільки, що похибкою від її зміни не можна знехтувати.

Вимірювання за ознакою особливостей визначення похибок вимірів класифікують на лабораторні та технічні.

*Лабораторні вимірювання* – це виміри, у яких похибки кожного результату вимірювання оцінюють за даними, що одержані при цьому вимірі. Лабораторні вимірювання виконують найчастіше універсальними взірцевими засобами виміру в метрологічних дослідженнях еталонів одиниць та при розробці і атестації методик виконання технічних вимірювань.

*Технічні вимірювання* – це виміри, які виконують у заданих умовах згідно з загально прийнятою методикою. При цьому похибки вимірювання, які при виконанні вимірів окремо не визначають, повинні бути нижче встановлених нею.

Технічні вимірювання виконуються за атестованими методиками за допомогою серійних засобів вимірювань, які повинні забезпечувати необхідний рівень точності. Аналіз похибок результатів технічних вимірів не обов'язковий.

Вимірювання фізичних величин за наявності або відсутності розмірності у вимірюваних величин поділяють на вимірювання розмірних величин (абсолютні) та вимірювання безрозмірних величин (відносні).

Сутність вимірювання фізичних величин вимірювальними засобами полягає у порівнянні (співставленні) їх з однорідною фізичною величиною, яка прийнята за одиницю виміру. Метод вимірювання обирають залежно від необхідної точності і наявності засобів вимірювання.

*Метод вимірювання* – це сукупність прийомів застосування принципів і засобів вимірювання. Вимірювання виконують одним з двох методів – безпосередньої оцінки або порівняння з мірою.

*Метод безпосередньої оцінки* полягає у визначенні значення вимірюваної величини безпосередньо по шкалі або іншому вказівнику вимірювального засобу. Наприклад, вимірювання напруги на дузі вольтметром.

*Метод порівняння з мірою* полягає у порівнянні вимірюваної величини з однорідною величиною, яку відтворює міра, та має наступні різновиди – диференціальний, нульовий і компенсаційний метод або метод заміщення.

При диференціальному методі, який ще називають різницевим, на вимірювальний прилад діє різниця між вимірюваною і зразковою величинами. Останню відтворює відповідна роду вимірюваної величини міра. Чим менша різниця, тим точніше результат вимірювання. Граничним випадком

диференційного методу є нульовий метод, при якому різницю доводять до нуля. При використанні компенсаційного методу вимірювану величину заміщують відомою величиною, яку відтворюють відповідною мірою.

### 1.3. Похибки вимірювань

Результат вимірювання фізичної величини завжди відрізняється від істинного значення на деяку величину, яку називають похибкою. Залежно від джерела виникнення, умов проведення вимірювань, характеру проявлення вимірюваної величини у часі та її вираження похибки класифікують наступним чином:

- по джерелу виникнення – похибки методу, інструменту і оператора
- по умовах проведення вимірювань – основні і додаткові
- по характеру проявлення – систематичні, випадкові і грубі (промахи)
- по способу вираження – абсолютні, відносні і приведені.

*Похибка методу вимірювання* обумовлена недосконалістю методу і прийомів використання засобів вимірювання. Наприклад, при визначенні потужності постійного струму по показам амперметра і вольтметра без урахування потужності, що споживають ці прилади, виникає похибка методу.

*Інструментальна похибка вимірювання* обумовлена похибками виготовлення засобів вимірювання, що застосовують.

*Суб'єктивна похибка вимірювання* обумовлена недосконалістю сприйняття візуальної, світлової, звукової та інших інформаційних сигналів оператором.

*Основна похибка вимірювання* – це похибка, що виникає у нормальних умовах експлуатації засобу вимірювання (температура середовища, вологість, напруга живлення, тощо), які нормовані і вказані у технічному паспорті на засіб вимірювання, технічних умовах або стандартах.

*Додаткова похибка вимірювання* обумовлена відхиленням однієї або декількох величин, що впливають на вимірювану величину, від нормального значення (зміна температури середовища, вологості, напруги живлення, тощо). Значення додаткової похибки нормують і вказують у документації на засіб вимірювання.

*Систематична похибка вимірювання* – це постійна або змінна похибка засобу вимірювання, яка закономірно змінюється при повторних вимірах однієї величини в однакових умовах вимірювання. Систематична складова основної похибки при незмінних вхідному сигналі і умовах вимірювання залишається незмінною або змінюється настільки повільно, що її змінами можна знехтувати, або змінюється по певному закону, що можливість її врахування.

*Випадкова похибка* – це похибка вимірювання, характер зміни якої при повторних вимірах однієї величини в однакових умовах випадковий.

*Груба похибка (промах)* – це похибка вимірювання, яка суттєво перевищує очікувану у вимірюваннях.

*Статична і динамічна похибка* – це похибка при вимірюванні постійної і змінної у часі величини.

*Абсолютна похибка вимірювання  $\Delta$*  – це різниця між результатом вимірювання  $X$  і істинним значенням  $X_0$ :

$$\Delta = X - X_0$$

Абсолютна похибка відображається в одиницях вимірюваної величини.

*Відносна похибка вимірювання  $\delta$*  – це відношення абсолютної похибки вимірювання  $\Delta$  до істинного значення вимірюваної величини  $X_0$ :

$$\delta = \Delta / X_0 = (X - X_0) / X * 100\%$$

Відносна похибка – це безрозмірна величина.

У зв'язку з тим, що істинне значення вимірюваної величини  $X_0$  невідомо, то на практиці використовують дійсне значення вимірюваної величини  $X_D$ , при цьому приймають  $X_0 = X_D$ .

Дійсне значення величини  $X_D$  знаходять експериментально шляхом застосування більш точних методів і засобів вимірювання. За дійсне значення вимірюваної величини у більшості випадків приймають покази зразкових засобів вимірювання.

*Абсолютна похибка вимірювання  $\Delta$*  – це різниця між результатом вимірювання  $X$  і істинним значенням  $X_0$ :

$$\Delta = X - X_0$$

Абсолютна похибка відображається в одиницях вимірюваної величини.

*Відносна похибка вимірювання  $\delta$*  – це відношення абсолютної похибки вимірювання  $\Delta$  до істинного значення вимірюваної величини  $X_0$ :

$$\delta = \Delta / X_0 = (X - X_0) / X * 100\%$$

Відносна похибка – це безрозмірна величина.

У зв'язку з тим, що істинне значення вимірюваної величини  $X_0$  невідомо, то на практиці використовують дійсне значення вимірюваної величини  $X_D$ , при цьому приймають  $X_0 = X_D$ .

Дійсне значення величини  $X_D$  знаходять експериментально шляхом застосування більш точних методів і засобів вимірювання. За дійсне значення вимірюваної величини у більшості випадків приймають покази зразкових засобів вимірювання.

#### **1.4. Обробка результатів вимірювань**

Результат вимірювання, під яким розуміють значення фізичної величини, що визначають за допомогою засобів вимірювання, отримують після відповідної обробки результатів вимірювань.

По-перше визначають систематичну складову похибки і виключають промахи. Систематичну складову виключають шляхом введення поправки  $\Delta X$ , значення якої дорівнює абсолютній систематичній похибці  $\Delta$  і яку беруть з протилежним знаком:

$$\Delta X = - \Delta$$

З урахуванням поправки результат вимірювань приймає значення:

$$X = X_{\Delta} + \Delta X$$

По-друге, визначають випадкову складову похибки, вплив якої зменшують багатократним повторенням одного і того ж виміру в однакових умовах з послідуною обробкою результатів вимірів методами математичної статистики.

Імовірність появи позитивних і негативних випадкових похибок однакова. Тому за результат вимірів при достатньо великій їх кількості приймають середнє арифметичне  $X_{CP}$  з усіх результатів, яке визначають з наступного виразу:

$$X_{CP} = (X_1 + X_2 + \dots + X_N) / N = (\sum_{i=1}^N X_i) / N$$

где  $N$  – кількість вимірів.

Середнє значення вимірюваної величини  $X_{CP}$  відповідає її математичному очікуванню  $M_X$ .

Відхилення значень вимірюваної величини від її середнього значення у кожній точці вимірювання характеризують дисперсією випадкової величини  $D_X$  або середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_X$ , які вираховують за наступними формулами:

$$D_X = \sum_{i=1}^N (X_i - X_{CP})^2 / (N - 1)$$

$$\sigma_X = \sqrt{D_X}$$

З урахуванням систематичної і випадкової складаючи похибки границі можливих значень вимірюваної величини визначають за наступним виразом:

$$X = X_{CP} \pm (\Delta + 2\sigma_X), \text{ з імовірністю } 95\%.$$

При обробці результатів опосередкованих вимірювань, коли спонукувана величина  $X$  дорівнює добутку декількох величин, що вимірюють прямим методом:

$$X = A^K * B^L * C^M,$$

де  $A, B, C$  – вимірювані величини,  $K, L, M$  – постійні числа.

Гранична відносна похибка опосередкованого вимірювання визначають за наступним виразом:

$$\delta X = |K \cdot \delta A| + |L \cdot \delta B| + |M \cdot \delta C| + \dots$$

Наприклад, при визначенні потужності електричного струму за формулою:

$$P = I^2 \cdot R,$$

де  $I$  – сила електричного струму,  $R$  – омичний опір провідника.

Відповідно,  $I = A$ ,  $R = B$ ,  $K = 2$ ,  $L = 1$ . Тоді, загальна відносна похибка опосередкованого вимірювання складає:

$$\delta P = 2\delta I + \delta R, \%$$

При обробці опосередкованих вимірювань, якщо вимірювана величина  $X$  дорівнює сумі (різниці) декількох однорідних величин  $X = X_1 \pm X_2 \pm \dots$ , граничну відносну похибку визначають за виразом:

$$\delta X = (|X_1 \cdot \delta_1| + |X_2 \cdot \delta_2| + \dots + |X_N \cdot \delta_N|) / N,$$

де  $N$  – кількість вимірюваних величин.

При обробці результатів вимірювань отримують чисельне значення вимірюваної величини. Отримані значення похибок вимірювання дозволяють оцінити чисельні значення, які є достовірними.

### 1.5. Оцінка випадкових похибок прямого вимірювання

Пряме вимірювання – це вимірювання однієї фізичної величини, значення якої знаходять безпосередньо – без перетворення її роду та використання функціональних залежностей.

Прямі багатократні вимірювання поділяються на рівно та нерівно точні. Рівноточними називаються вимірювання, що проводяться засобами вимірювання однакової точності за однією і тією ж методикою при незмінних зовнішніх умовах. При рівноточних вимірюваннях середні квадратичні відхилення результатів всіх рядів вимірювань рівні між собою.

Задача обробки результатів багатократних вимірювань полягає в знаходженні оцінки вимірюваної величини і довірчого інтервалу, в якому знаходиться її дійсне значення.

Випадкові похибки рівноточних прямих вимірювань проявляються при багаторазових спостереженнях вимірюваної величини в однакових умовах одним оператором і за допомогою одного й того самого засобу вимірювання.

При статистичній обробці результатів багаторазових прямих вимірювань необхідно виконати наступну послідовність дій:

- провести багаторазові вимірювання і отримати масив значень вимірюваної величини  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ;
- скорегувати результати вимірювання, вилучивши відомі систематичні похибки шляхом внесення поправок у результати вимірів;

- знайти математичне сподівання виправлених результатів вимірювання і прийняти його за дійсне значення.

Для нормального закону розподілу величин, а якщо знехтувати ефективністю оцінки, то і для всіх симетричних законів розподілу, за оцінку математичного очікування ряду рівноточних вимірювань приймають середнє арифметичне, що визначають за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- визначити випадкове відхилення за наступною формулою:

$$g_i = X_i - \bar{x}$$

Дана різниця представляє собою випадкове відхилення (випадкову абсолютну похибку) при  $i$ -му вимірюванні і може бути позитивним та негативним.

Середнє арифметичне незалежно від закону розподілу має наступні властивості, що використовуються для перевірки правильності обчислення  $\bar{x}$ :

$$\sum_{i=1}^n g_i = 0 \quad i \quad \sum_{i=1}^n g_i^2 = \min$$

- обчислити середнє квадратичне відхилення результатів вимірювання за формулою Бесселя:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Для серії  $n$  вимірювань однієї й тієї ж величини параметр  $S$  характеризує розсіювання результатів багаторазових  $n$  вимірювань однієї й тієї ж величини.

Середнє арифметичне значення вимірюваної величини залежить від числа вимірювань і є випадковою величиною та має деякі дисперсії відносно істинного значення.

- визначити квадратичне відхилення середнього арифметичного значення за формулою:

$$\sigma[\bar{x}] = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Таким чином, якщо в якості результату багаторазових вимірювань вибрати середнє арифметичне  $\bar{x}$ , то випадкова похибка  $S$  зменшується в  $\sqrt{n}$  раз порівняно з випадком, коли за результат вимірювання буде прийматися будь-яке одне з  $n$  спостережень. Тому багаторазові вимірювання з наступним усередненням результатів і прийняттям цього середнього за результат вимірювання є досить ефективним методом зменшення випадкової похибки.

- визначити довірчі границі похибки вимірювання, що представляють собою верхню й нижню границі інтервалу, який накриває з заданою ймовірністю похибку вимірювання.

Якщо число вимірювань  $n \leq 30$ , то довірчий інтервал випадкової похибки при заданих ймовірності  $P$  і середньому квадратичному відхиленню  $\bar{\sigma}[\bar{x}]$  визначається за формулою Стюдента:

$$\Delta_{\bar{x}} = \pm k_t \cdot \bar{\sigma}[\bar{x}],$$

де  $k_t$  – коефіцієнт Стюдента, який залежить від заданої ймовірності  $P$ , яку у більшості випадків приймають  $P = 0,95$ , і числа вимірювань  $n$ .

### 1.6. Оцінка випадкових похибок опосередкованого вимірювання

При статистичній обробці результатів багаторазових опосередкованих вимірювань необхідно виконати наступну послідовність дій:

- визначити для результатів прямих вимірювань  $\bar{X}$  і  $\bar{\sigma}[\bar{X}]$
- визначити значення невідомої величини  $\bar{q} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$
- визначити «вагу» кожної часткової похибки опосередкованих вимірювань  $q$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i = \bar{x}_i}$$

- обчислити часткові випадкові похибки опосередкованих вимірювань

$$\bar{e}_{\bar{x}_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \bar{\sigma} \cdot [\bar{x}_i]$$

- знайти оцінку середнього квадратичного відхилення результату опосередкованих вимірювань

$$\bar{\sigma}_{\bar{q}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \bar{\sigma}_{\bar{x}_i}^2}$$

- знайти коефіцієнт Стюдента  $k_t$  за заданою довірчою ймовірністю  $P$  і кількістю вимірювань  $n$ .
- знайти граничні значення випадкової складової похибки, яку приймають за похибку опосередкованого вимірювання

$$\Delta = \pm k_t \cdot \bar{\sigma}_{\bar{q}}.$$

Результат опосередкованого вимірювання:

$$q \pm \Delta, \text{ з ймовірністю } P$$

При визначенні похибки результату опосередкованого вимірювання застосовують наступні правила.

1. Якщо результат вимірювання представляється сумою або різницею двох і більше виміряних величин:

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w)$$

і похибки  $\Delta x, \dots, \Delta w$  незалежні і випадкові, то абсолютна похибка результату може бути визначена за формулою

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + \dots + (\Delta z)^2 + (\Delta u)^2 + \dots + (\Delta w)^2}$$

Коли похибки аргументів корельовані, тобто не є незалежними, значення  $\Delta q$  може перевищувати отримане вище, але завжди буде задовольняти умові

$$\Delta q \leq \Delta x + \dots + \Delta z + \dots + \Delta u + \dots + \Delta w$$

2. Якщо кінцевий результат вимірювання представляється добутком або часткою двох і більше виміряних значень величин:

$$q = \frac{x \cdot \dots \cdot z}{u \cdot \dots \cdot w}$$

і похибки  $(\delta x)^2 \dots (\delta w)^2$  незалежні і випадкові, то відносна похибка результату опосередкованого вимірювання визначається

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}$$

3. Якщо результат опосередкованого виміру є функцією однієї величини:

$$q = f(x),$$

то похибка результату визначається

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \cdot \delta x.$$

4. В загальному випадку похибка функції декількох величин

$$q = f(x, y, \dots, w)$$

похибки яких незалежні і випадкові, знаходиться за формулою:

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \cdot \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \cdot \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial w} \cdot \delta w\right)^2}$$

але сумарна похибка ніколи не перевищить значення:

$$\delta q \leq \left| \frac{dq}{dx} \right| \cdot \delta x + \left| \frac{dq}{dy} \right| \cdot \delta y + \dots + \left| \frac{dq}{dw} \right| \cdot \delta w$$

### 1.7. Оцінка випадкових похибок сукупних і сумісних вимірювання

При сукупних та сумісних вимірюваннях невідомі величини  $x_i$ , що підлягають безпосередньому вимірюванню, визначають за результатами вимірювання інших величин, які функціонально пов'язані з ними









Середнє квадратичне відхилення результатів сукупних (сумісних) вимірювань знаходять за формулою

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{A_{hi} \cdot \sum_{j=1}^m v_j^2}{D \cdot (m-n)}}$$

де  $m$  – кількість умовних рівнянь,  $n$  – кількість невідомих,  $A_{hi}$  – ад'юнкти (алгебричні доповнення) елементів  $b_{hi}$  головної діагоналі визначника  $D$  (для  $h = i$ ). які отримують викресленням  $h$ -го рядка та  $i$ -го стовпця, відповідне даному елементу  $b_{hi}$ , з наступним до множенням на  $(-1)^{h+i}$ . Для  $n = 2$  ад'юнкти:  $A_{11} = b_{22}$ ;  $A_{22} = b_{11}$ .

Задавшись значенням довірчої ймовірності, знаходять відповідне значення коефіцієнта довіри  $t_p$ . У цьому випадку число ступенів свободи дорівнюють:

$$k = m - n$$

Довірчі границі випадкової похибки сукупних (сумісних) вимірювань становлять

$$\Delta_i = \pm t_p \cdot S_{\bar{x}}$$

### 1.8. Класи точності засобів вимірювання

Клас точності – це узагальнююча характеристика засобів вимірювання, що визначається межами допустимих основних і додаткових похибок, а також іншими властивостями засобів вимірювання, які впливають на їх точність.

Межі допустимих похибок встановлюються у стандартах на окремі види засобів вимірювання. Клас точності не є безпосереднім показником точності засобів вимірювання, а лише характеризує їх властивості по відношенні до точності, тому що на точність вимірювання впливають також методи і умови проведення вимірів.

Межі допустимих основної і додаткової похибки засобів вимірювання встановлюються для кожного класу точності у вигляді абсолютних, відносних і приведених похибок.

Засоби вимірювання, межі допустимої основної похибки яких задані у вигляді приведених або відносних похибок, присвоюють класи точності, що обирають зі стандартного ряду:

$$K = (1,0; 1,5; 2,0; 3,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) 10^n,$$

де  $n = 1; 0; -1; -2$ .

В дужках вказані значення похибок у процентах. При цьому, чим вище клас точності, тим меншим значенням він позначений. Наприклад, клас точності 0,5 ( $K = 5; n = -1$ ) вище класу точності 1,5 ( $K = 1,5; n = 0$ ).

Таким чином, у такому випадку клас точності засобів вимірювання може бути визначений як гранична межа основної похибки, приведеної до всього діапазону вимірювання і вираженої у процентах.

Границі допустимої основної похибки – це встановлені для нормальних умов екстремальні (найбільші і найменші) відхилення значень номінальної статистичної функції перетворення при заданій довірчій імовірності, симетрично розташовані по обидві сторони від цієї функції.

Границі допустимої основної похибки, що вміщують випадкову і систематичну складові похибки, – це найбільше і найменше допустимі значення додаткової похибки, що викликана умовами вимірювань, які відрізняються від нормальних умов.

Під нормальними умовами використання засобів вимірювання розуміють умови, при яких впливові величини, а саме – температура оточуючого середовища, тиск, вологість та ін. мають нормальні значення, а також певне просторове положення, відсутність вібрацій, електромагнітних полів, випромінювання.

У якості нормальних значень або області нормальних значень впливових величин, як правило, приймається температура оточуючого повітря –  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , тиск –  $101,325 \pm 3,3$  кПа ( $760 \pm 25$  мм рт. ст.), відносна вологість – 30 – 80% і ін.

Вказані нормальні умови використання засобів вимірювання у більшості випадків не є робочими умовами їх експлуатації. Тому для засобів вимірювання визначають область значень впливової величини, яку оговорюють у технічних умовах або стандартах, при якій значення додаткової похибки не повинно перевищувати встановлених границь.

### **1.9. Статичні і динамічні характеристики**

Засоби вимірювання крім характеристик точності мають ще статичні і динамічні характеристики, які відображають взаємозв'язок вхідних і вихідних сигналів у сталих та перехідних режимах.

У більшості випадків засоби вимірювання здійснюють перетворення вхідних сигналів у вихідні і мають властивість направленості, що означає виключення дії вихідного сигналу на вхідний. При цьому це перетворення може бути описано у загальному вигляді залежністю:

$$y = f(x),$$

яка у сталому режимі називається статичною характеристикою або градуіровочною характеристикою чи рівнянням шкали.

Статичні характеристики вимірювальних приладів і перетворювачів можуть бути задані аналітично, у вигляді таблиць або графіків (рис.1.9.1).

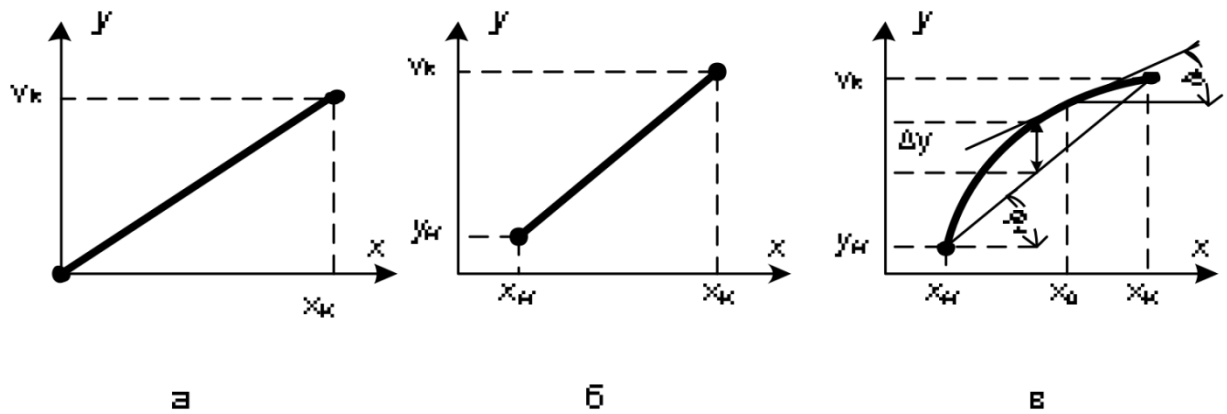


Рис. 1.9.1. Статичні характеристики засобів вимірювання  
*a, б* – лінійні, *в* – нелінійна

Лінійна або лінеаризована статична характеристика може бути описана у загальному випадку рівнянням наступного виду:

$$y = a + kx,$$

де  $a$  – постійна, що має розмірність вихідної змінної  $y$ ;

$k$  – коефіцієнт передачі, що має розмірність  $y/x$ .

Тоді рівняння шкали приладу можна записати наступним чином:

$$y = y_n + S \cdot (x - x_n),$$

де  $y_n$  і  $x_n$  – початкові значення вихідної і вхідної величин, відповідно;

$S$  – чутливість приладу, яка визначається по формулі:

$$S = \frac{y_k - y_n}{x_k - x_n} = \frac{Y_D}{X_D},$$

де  $Y_D$  і  $X_D$  – діапазон зміни вихідного і вхідного сигналів.

На практиці для проведення вимірювань бажано використовувати засоби з лінійною статичною характеристикою. Однак, при застосуванні засобів вимірювання з нелінійною характеристикою, останню по можливості необхідно лінеаризувати, використовуючи метод дотичної або метод січення.

Мірою оцінки нелінійності характеристики служить відносна не лінійність, яку визначають співвідношенням:

$$G = \Delta Y / (X_K - X_N),$$

де  $\Delta Y$  – максимальне відхилення вихідної координати статичної характеристики, що з'єднує початок і кінець нелінійної характеристики (рис. 1.9.1).

Під чутливістю приладу з нелінійною характеристикою розуміють межу відношення вихідної величини  $\Delta Y$  до зміни вхідної  $\Delta X$ :

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

Таким чином, чутливість для приладу з лінійною характеристикою залишається постійною, а для нелінійної залежить від вхідного сигналу.

При лінеаризації статичної характеристики методом дотичної чутливість засобу вимірювання по графіку можна визначити наступним чином:

$$S = k_K = \frac{dy}{dx} \Big|_{x_0} = \frac{n_y}{n_x} \tan \varphi,$$

А при використанні методу січення, який припустимо застосовувати при невеликих значеннях  $\Delta Y$ , використовують вираз (див. рис. 1.9.1):

$$S = k_c = \frac{Y_D}{X_D} = \frac{n_y}{n_x} \tan \varphi_1$$

де  $n_y$  і  $n_x$  масштаби графіка  $y = f(x)$  по відповідним осям.

Коефіцієнт передачі засобів вимірювання залежить від їх структури і кількості елементів, що входять у схему вимірювання. Не дивлячись на велику різноманітність структурних схем для засобів вимірювання, можна виділити три основних типи з'єднання між елементами вимірювальних пристроїв і вимірювальних комплексів: послідовне, паралельне і паралельно зустрічне (з зворотнім зв'язком), які представлені на рис. 1.9.2.

Для послідовного з'єднання елементів еквівалентний коефіцієнт передачі визначається відповідно з формулою:

$$K_{екв} = \prod_{i=1}^n K_i,$$

де  $n$  – кількість елементів у схемі.

Для паралельного з'єднання:

$$K_{екв} = \sum_{i=1}^n K_i$$

Для паралельно зустрічного з'єднання:

$$K_{екв} = \frac{K_1}{1 \pm K_1 K_2}$$

При цьому знак «+» відповідає негативному зворотному зв'язку, а знак «-» - позитивному.

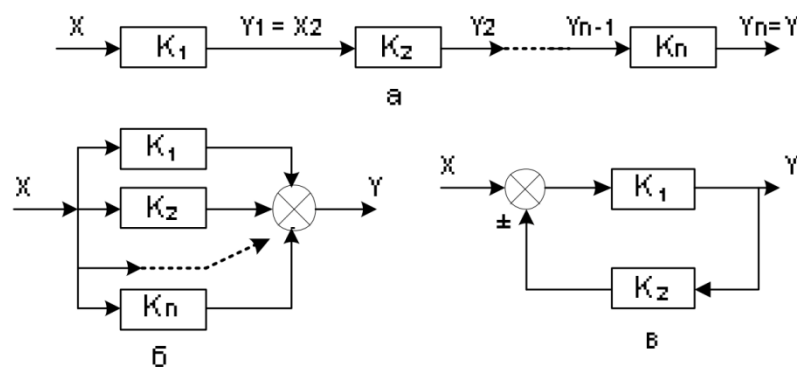


Рис. 1.9.2. З'єднання структурних ланок засобів вимірювання  
 а – послідовне, б – паралельне, в - паралельно зустрічне

*Поріг чутливості* вимірювального приладу – це найменше значення вимірюваної величини, яке здатне викликати найменші зміни показань вимірювального приладу. Як правило, поріг чутливості виражається у долях допустимої основної абсолютної похибки засобу вимірювання.

*Варіація* - це величина, що характеризує стабільність статичної характеристики засобу вимірювання і визначається як найбільша різниця

$$V_x = |y_i - y'_i|$$

між вихідними сигналами приладу, що відповідають одному і тому ж значенню вимірюваної величини при збільшенні і зменшенні вимірюваної величини  $x_i$  (рис. 1.9.3).

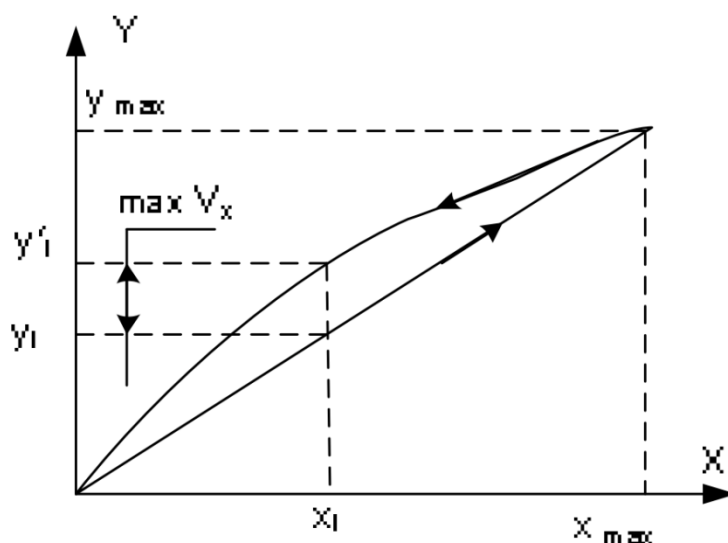


Рис. 1.9.3. Несталість ходу статичної характеристики

Варіацію засобів вимірювання зазвичай виражають у процентах нормуючого значення вимірюваної величини (діапазону вимірювань) і визначають по формулі:

$$\text{Var} = \frac{V_x}{X_N} = \frac{V_x}{X_{max} - X_{min}} 100\%$$

Динамічні характеристики засобів вимірювання визначаються перехідними процесами, які відбуваються в них у результаті дії ступінчатих, імпульсних або коливальних збурень на вході. Види аперіодичного і коливального перехідних процесів у засобах вимірювання на ступінчате збурення представлені на рис. 1.9.4.



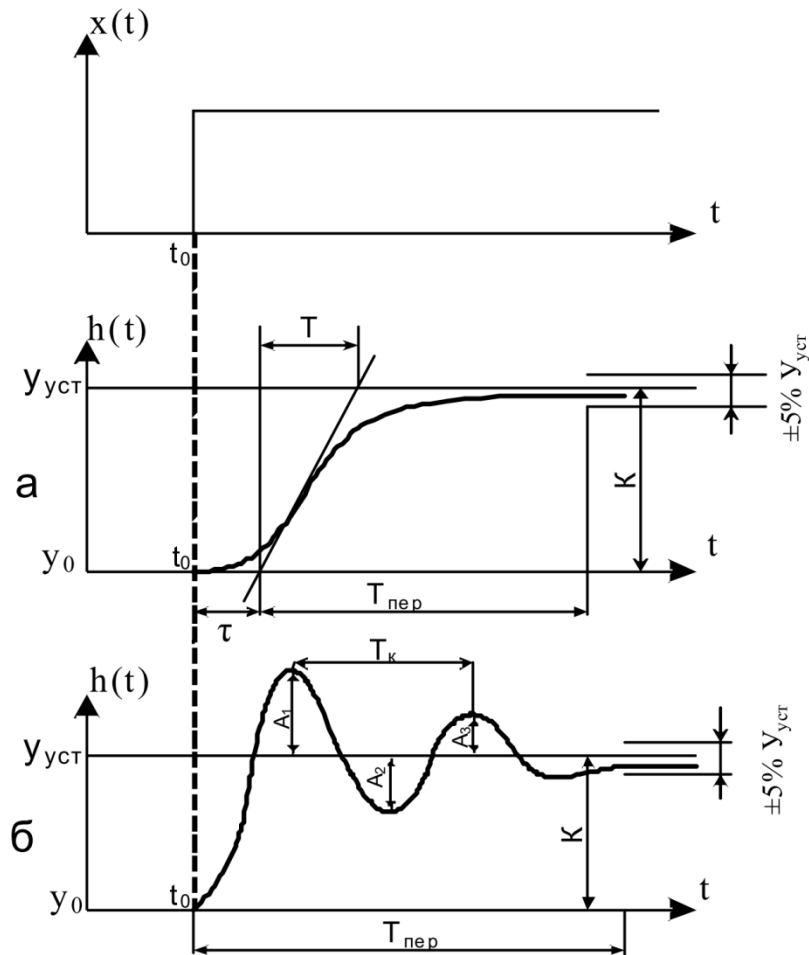


Рис. 1.9.4. Перехідні процеси у засобах вимірювань.  
 а – періодичний; б - коливальний

По перехідним характеристикам, які представлені на рис. 1.9.4., можна визначити ряд параметрів, що характеризують динамічні властивості засобів вимірювання. До них відносяться:

1.  $T$  – постійна часу приладу;
2.  $T_{пер.}$  – час заспокоєння;
3.  $\tau$  – час запізнення;
4.  $T_k$  – період коливань;
5.  $K$  – коефіцієнт передачі;
6.  $A_1$  – динамічна похибка, під якою розуміють максимальне значення першої амплітуди коливань від значення, що встановилося.

7. Ступінь затухання - 
$$\psi = \frac{A_1}{A_1 - A_2}$$

По перехідним характеристикам засобів вимірювання визначають також передаточні функції, амплітудно-фазові і частотні характеристики.

Для визначення тих чи інших динамічних характеристик засобів вимірювання необхідно керуватися їх призначенням і умовами застосування.

Найбільш часто застосовують такі динамічні характеристики як час встановлення показів, а також робочий діапазон частот.

Таким чином, динамічні характеристики засобів вимірювання визначають їх динамічну похибку, під якою розуміють різницю між похибками у динамічному і статичному режимах вимірювання у певний момент часу.

Значення динамічних похибок для засобів вимірювання з лінійною статичною характеристикою у різних точках вимірів залишаються практично однаковими. Якщо при визначенні динамічних похибок вони змінюються у різних точках вимірів, то засіб вимірювання має нелінійну статичну характеристику.

## **2. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУР**

### **2.1. Температура і температурні шкали**

*Температура* – це ступінь нагрівання речовини. Поняття засновано на властивості передавати тепло різними тілами і речовинами одне одному при різному ступені їх нагріву.

Температура може також бути визначена як параметр теплового стану речовини, що обумовлений середньою кінетичною енергією руху його молекул. З даного положення слідує, що поняття температура є статистичним.

Для кількісного визначення температури необхідно обрати ту чи іншу температурну шкалу. Шкали температури побудовані на основі певних фізичних властивостей якоїсь речовини, які не повинні залежати від сторонніх чинників і які можна точно і зручно виміряти.

На практиці не існує жодної термометричної властивості тіла або речовини, які б повністю задовольняли вказаним вимогам в усьому діапазоні вимірюваних температур. Тому температурні шкали визначаються для різних температурних діапазонів, побудованих на вільному припущенні лінійно залежності між властивістю термометричного тіла і температурою. Такі шкали називають умовними, а вимірювана по цій шкалі температура – умовною.

Одна з найбільш поширених умовних температурних шкал – шкала Цельсія. По цій шкалі у якості границь умовного діапазону вимірювань прийняті точки плавлення льоду і кипіння води при нормальному атмосферному тиску. Одну соту частину шкали прийнято називати одним градусом Цельсія ( $1^{\circ}\text{C}$ ).

Для створення єдиної температурної шкали, не пов'язаної з термометричними властивостями різних речовин для широкого інтервалу температур, Кельвіном була запропонована шкала температур, яка основана на

другому законі термодинаміки. Шкала отримала назву термодинамічної температурної шкали.

У основі термодинамічної шкали лежать наступні положення. Якщо при циклі Карно тіло поглинає теплоту  $Q_1$  при температурі  $T_1$  і віддає тепло  $Q_2$  при температурі  $T_2$ , то повинно витримуватися наступне рівняння:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

Згідно положенням термодинаміки дане співвідношення на залежить від властивостей робочого тіла.

Термодинамічна температурна шкала Кельвіна використовується як первинна шкала для інших температурних шкал, що не залежать від термометричних властивостей робочої речовини. Для визначення одного градуса по цій шкалі інтервал між точками плавлення льоду і кипіння води ділять на сто рівних частин. Таким чином,  $1^\circ\text{C}$  дорівнює  $1^\circ\text{K}$ .

По шкалі Кельвіна, яку прийнято називати абсолютною, за нульову точку приймається температура на  $273,15$  градуса нижче точки плавлення, яку називають абсолютний нуль. Теоретично доказано, що при цій температурі припиняється будь-який тепловий рух любої речовини, тому ця шкала у певній мірі носить теоретичний характер.

Між температурою по шкалі Кельвіна і Цельсія існує співвідношення:

$$t = T - T_0,$$

де  $T_0 = 273,15\text{K}$ .

Для практичного і зручного відтворення термодинамічної шкали у широких діапазонах вимірювання температур прийняті і використовуються Міжнародні практичні температурні шкали (МПТШ). На сьогодні діє прийнята у 1968 році температурна шкала МПТШ – 68, побудова якої базується на реперних точках, які визначаються фазовим станом речовин. Реперні точки, які використовують у якості еталонів температур у різних діапазонах, наведені у табл. 2.1.

На сьогоднішній день температуру крім кельвінів (K) і градусів Цельсія за кордоном виражають у градусах Фаренгейта ( $^\circ\text{F}$ ), градусах Ранкіна ( $^\circ\text{Ra}$ ) і градусах Реомюра ( $^\circ\text{Re}$ ).

Таблиця 2.1. Основні реперні точки по МПТШ-68

N пп	Стан фазової рівноваги	Значення температури	
		<i>K</i>	<i>°C</i>
1	Трійна точка рівноважного водню	13,81	-259,34
2	Точка кипіння рівноважного водню	20,28	-252,89
3	Рівновага між рідкою і паровою фазами неону	27,102	-246,048
4	Трійна точка рівноважного кисню	54,361	-218,789
5	Точка кипіння кисню	90,188	-182,962
6	Трійна точка води (основна точка)	273,16	0,01
7	Рівновага між рідкою і паровою фазами води	373,15	100
8	Рівновага між твердою і рідкою фазами цинку	692,73	419,58
9	Рівновага між твердою і рідкою фазами сірки	717,75	444,6
10	Рівновага між твердою і рідкою фазами срібла	1235,08	961,93
11	Рівновага між твердою і рідкою фазами золота	1337,58	1064,43

\*Трійна (двійна) рівноважна точки речовини означають одночасне існування відповідної кількості фаз.

## 2.2. Термоелектричний метод вимірювання температур

Термоелектричний метод вимірювання температур ґрунтується на функціональній залежності термоелектрорушійної сили (термо – е.р.с.) від температури. Вимірювальний пристрій, у якому реалізується даний принцип, зазвичай складається з двох спаяних (зварених) різнородних металів (термопара) і електровимірювального пристрою. Термоелектричні термометри використовують для вимірювання температур від мінус 200 до плюс 2500°С.

До переваг термоелектричних термометрів відносять високу точність, можливість централізованого контролю температур декількох точок, реєстрації показів та дистанційної їх передачі.

Недоліком термоелектричного методу є вплив агресивних середовищ на термопару, що збільшується при зростанні температури і знижує термін служби термопари.

### 2.2.1. Теоретичні основи термопар

В основу вимірювання температур за допомогою термопар закладено фізичне явище, яке відкрив Зеєбек у 1821 році, виникнення електричного струму в мережі, складеної з двох провідників і температур у місцях їх приєднання.

Розглянемо електричну мережу, наведену на рис. 1, що складається з провідників  $A$  і  $B$  (наприклад, міді та платини). При нагріванні спаю 1 у мережі

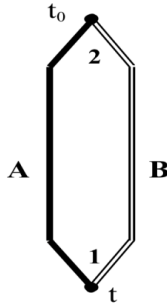


Рис. 1. Термоелектрична мережа з двох провідників

з'являється електричний струм, який направлений від платини  $B$  до міді  $A$ , а у холодному спаї 2 – від міді до платини. При нагріванні спаю 2 струм міняє свій напрямок. При цьому електрорушійна сила обумовлена неоднаковістю температур у спаєх 1 і 2.

Механізм виникнення термо-е.р.с. обумовлений наявністю вільних електронів у металах. У різних металів щільність вільних електронів неоднакова. Тому електрони з області з більшою щільністю будуть проникати у область з меншою щільністю. Внаслідок цього у місцях контакту двох різнорідних металів, наприклад, у спаї 1 буде дифузія електронів з провідника  $A$  у провідник у більшій кількості, ніж у зворотному напрямку – з металу  $B$  у метал  $A$ . Тому провідник  $A$  буде заряджатися позитивно, а метал  $B$  – негативно. У такому стані між провідниками  $A$  і  $B$  виникає деяка різниця потенціалів, так звана динамічна рівновага.

Крім того термоелектричний струм виникає і в замкненому однорідному провіднику, якщо є температурний градієнт, так як у любому, навіть у розімкненому провіднику, кінці якого мають різну температуру з'являється різниця потенціалів.

Приймаючи до уваги обидва ці чинники, вираз для результуючої термо-е.р.с. у електричній мережі, що розглядається, може бути записаний на підставі другого закону Кирхгоффа наступним чином:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$$

де  $e$  – е.р.с. у відповідних точках контакту провідників.

При переміні порядку індексів  $A$  і  $B$  у точках контакту знак перед символом  $e$  повинен бути змінений на протилежний. Тоді рівняння може бути представлене у наступному вигляді:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Таким чином, терм-е.р.с., яку отримують у мережі з двох різномірних провідників при різних температурах спаїв, можна визначити як різницю е.р.с., що виникає на цих спаях.

Підтримуючі температуру спаю 2 постійною і приймаючи  $t_0 = const$ , то значення  $e_{AB}(t_0) = C$ , а рівняння може бути записано у наступному вигляді:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = \varphi(t)$$

Вираз носить назву градуїровочною залежності термопар и отримується на основі експериментальних даних. Як правило, при градуїровці термопар значення  $t_0 = 0^\circ C$ .

Термо –е.р.с., що створюється термопарами для різних матеріалів провідників мала і складає 0,01 – 0,07 мВ/град, та вимірюється за допомогою мілівольтметрів і потенціометрів. Різні схеми підключення термопарі до вимірювального пристрою представлені на рис. 2.

У першому випадку (рис.2, а) у термоелектричного термометра буде три кінця: робочий 1, що встановлюється у вимірюване середовище, і вільні 2 та 3, температура яких стабілізується і до яких підключається вимірювальний пристрій. У другому випадку (рис. 2, б) у термометра буде чотири кінця: робочий 1, вільний 2 і нейтральні 3 та 4, які можуть мату будь-яку, але однакову температуру  $t_1$ .

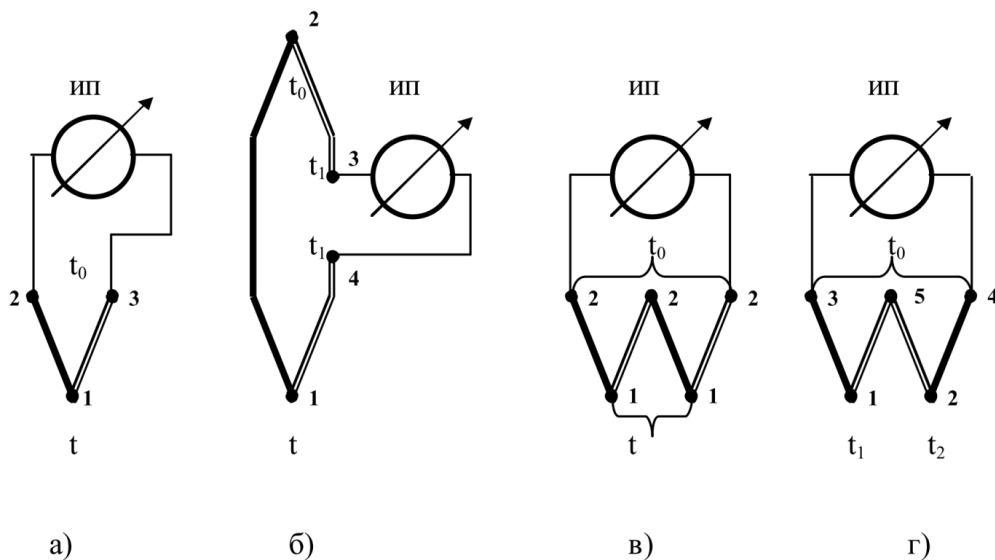


Рис. 2. Підключення термопар до вимірювальних пристроїв  
 а – включення у спай термопар; б – включення термоелектрону термопар; в – батарейне включення термопар; г – диференційне включення термопар

Для збільшення чутливості термоелектричного термометра термопари включаються у батарею (рис. 2, в), при цьому вільні кінці 2 термопар повинні мати однакову температуру, а результуючий сигнал батареї буде рівен суммі окремих сигналів.

Для вимірювання різниці температур за допомогою термоелектричного термометра використовують диференціальну схему включення термопар (рис. 2, г), при якій дві термопари включаються зустрічно і вимірюють різні температури  $t_1$  і  $t_2$ , а їх вільні кінці 3,4 і 5 повинні мати також однакову температуру.

При вимірюванні температури у практичних умовах температура вільних кінців термометру у більшості випадків не рівна  $0^\circ\text{C}$ , яка використовується при градуїровці, що потребує введення поправки у вимірювання на температуру вільних кінців.

Використовуючи рівняння визначимо величину поправки  $\Delta E(t, t'_0)$

$$\Delta E(t, t'_0) = E_{AB}(t, t_0) - E_{AB}(t, t'_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t) + e_{AB}(t'_0) = e_{AB}(t'_0) - e_{AB}(t_0)$$

Після проведення перетворень з урахуванням поправки рівняння прийме вид:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) + E_{AB}(t'_0, t_0)$$

де  $t_0$  – температура вільних кінців термопари.

З цього рівняння слідує, що збільшення температури вільних кінців термопари зменшує його вихідну термо-е.р.с. на значення, що дорівнює  $E_{AB}(t'_0, t_0)$ , тобто сигналу від такої ж термопари з температурами робочого і вільних кінців, які відповідно дорівнюють  $t'_0$  і  $t_0$ .

### 2.2.2. Стандартні промислові термопари

Для технічних цілей використовують велику кількість різноманітних термопар, які складаються з різних термоелектронів. До термоелектродних матеріалів при виготовленні і виборі для застосування в тих чи інших умовах вимірювання визначають певні вимоги: механічна міцність і жаростійкість, корозійна стійкість, стабільність і лінійність градуїровочної характеристики та висока чутливість.

Наприклад, з ростом температури зменшується механічна міцність термоелектродів і збільшується хімічна активність електродів у місці контакту. Термопари платинової групи добре працюють у нейтральних і окислювальних середовищах, але швидко руйнуються у відновлювальній середі (у присутності водню) при температурах більше  $500^\circ\text{C}$ .

Термопары на основі молибдену, вольфраму, ренію та їх сплавів, навпаки, добре працюють у відновлювальних середовищах и швидко виходять з ладу у окислювальних середах.

Надійна робота термопар у промислових умовах визначається не тільки якістю і властивостями термоелектродних матеріалів, але і якістю конструкції арматури термоелектричного термометра. Приймаючи до уваги, що термо – е.р.с. більшості термопар з металевими електродами мала, перевагу слід віддавати термопарам, які при інших рівних умовах мають більшу термо-е.р.с. Це дозволяє використовувати менш чутливі і, відповідно, більш надійні та недорогі вимірювальні прилади.

Найбільш розповсюдженими термопарами, що використовуються у термоелектричних термометрах, є термопари з благородних і неблагородних металів.

До термопар з благородних металів відносять платинородій – платинові (ТПП), а також платинородій – платино родієві (ТПР), які є кращими по точності термо – е.р.с. По призначенню ці термометри розділяють на еталонні, зразкові, робочі підвищеної точності і технічні. Характеристики еталонних і зразкових термометрів платинової групи наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.9 - Характеристики термопар платинової групи

Позначення термометра	Призначення термометрів	Діапазон виміру, °С	Похибка, °С*
ТПП-Э	Робочі еталони	630,7-1064,4	$\sigma = 0,1$
ТПП-О1	Зразкові 1-го розряду	300-1100	$\sigma = 0,1-0,2$
ТПП-О2	Зразкові 2-го розряду	300-1200	$\sigma = 0,2-0,5$
ТПП-О3	Зразкові 3-го розряду	300-1200	$\sigma = 0,4-1,0$
ТПР-О2	Зразкові 2-го розряду	600-1800	$\sigma = 0,25-2,5$
ТПР-О3	Зразкові 3-го розряду	600-1800	$\sigma = 0,5-3,5$
ТПП-РПТ	Робочі підвищеної точності	300-1200	$\Delta = 0,2-1,5$
ТПР-РПТ	Робочі підвищеної точності	600-1800	$\Delta = 0,4-8,0$

\*  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення результату вимірювання,  $\Delta$  - абсолютна допустима похибка.

Термопари з неблагородних металів широко застосовуються для вимірювання температур у різних областях техніки. Найбільш часто застосовують мідно – копелеві, залізо – копелеві, хромель – копелеві і хромель – алюмелеві термопари. Ці термопари використовують для вимірювання



температур рідини, газів, парів, поверхонь нагріву, а у деяких випадках для короткочасного вимірювання температури розплавлених металів.

Термоелектричні термометри з неблагородних металів дають більшу термо – е.р.с. у порівнянні з термопарами платинової групи і значно дешевші. Однак, отримання стандартної градуіровочної характеристики термопар з неблагородних металів важче, тому що ця характеристика залежить від складу металу кількості домішок у ньому.

Для високих температур застосовують вольфрам – ренієві або інші тугоплавкі з'єднання металів з графітом.

Вказані термопари з благородних і неблагородних металів є стандартними і використовуються згідно їх робочим діапазоном вимірювання. Характеристики цих термопар наведені у табл. 2.10.

Таблиця 2.10 - Стандартні робочі термопари з металевими електродами

Позначення термо-електричних термометрів	Найменування матеріалів термоелектродів	Позначення градуіровки	Діапазон вимірювання при тривалому застосуванні, °С	Допустима границя вимірювання при короткочасному застосуванні, °С
ТПП	Платинородий (10% родія)-платина	ПП	0 ÷ 1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родія)-платинородий (6% родія)	ПР30/6	300 ÷ 1600	1800
ТВР	Вольфрамрений (5% ренія)-вольфрамрений (20% ренія)	ВР5/20	0 ÷ 2200	2500
ТХА	Хромель-алюмель	ХА	-200 ÷ 1000	1300
ТХК	Хромель-копель	ХК	-200 ÷ 600	800
МК	Медь – копель	-	до +350	до +500
ЖК	Железо – копель	-	до +600	до +800

### **3. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

Державні стандарти встановлюють методи визначення механічних властивостей зварного з'єднання у цілому і окремих його ділянок, а також наплавленого металу для всіх видів зварювання металів і сплавів.

#### **3.1. Види випробувань і область застосування**

Стандарт встановлює методи визначення механічних властивостей при наступних видах випробувань металу різних ділянок зварного з'єднання та наплавленого металу

- а) на статичне (короткочасне) розтягування;
- б) на ударний вигін (на надрізаних зразках);
- в) на стійкість проти механічного старіння;
- г) вимірювання твердості;
- д) випробування зварного з'єднання на статичне розтягування;
- е) випробування зварного з'єднання на статичний вигін (загинання);
- ж) випробування зварного з'єднання на ударний розрив.

Стандарт розповсюджується на випробування, які проводять при визначенні якості продукції та зварювальних матеріалів, придатності способів і режимів зварювання, при встановленні кваліфікації зварників і показників здатності до зварювання металів і сплавів.

Види випробувань, типи зразків і використання методу передбачається у стандартах і технічних умовах на продукцію, які встановлюють технічні вимоги до неї.

#### **3.2. Відбір зразків**

Зразки для випробувань відбирають з проб, що вирізають безпосередньо конструкції, яку контролюють або від спеціально зварених для проведення випробувань контрольних. Якщо форма зварного з'єднання виключає можливість виготовлення зразків даного типу (деталі складної форми чи конфігурації, труби та ін.), то зразки можуть бути відібрані від спеціально зварених плоских контрольних з'єднань.

При виконанні контрольних з'єднань характер підготовки під зварювання, марка і товщина основного металу, марки зварювальних матеріалів, положення шва у просторі, початкова температура основного металу, режим зварювання і термічної обробки повинні повністю відповідати умовам виготовлення виробу, що контролюється або особливому призначенню випробувань.

Зварювання контрольних з'єднань, призначених для випробування зварювальних матеріалів (електродів, зварювальних дротів, присадкових

прутків та ін.), якщо нема спеціальних вимог, виконують з охолодженням кожного окремого шару. Температура, до якої повинен охолонути метал, встановлюється стандартом або іншою технічною документацією.

Розміри пластин для виготовлення контрольних з'єднань визначаються вимогами, вказаними нижче. Для контрольних з'єднань, що виконуються дуговим, електрошлаковим і газовим зварюванням з плоских елементів, ширина кожної пластини, що зварюють, якщо нема інших вказівок, повинна бути не менше:

- 50 мм - при товщині металу до 4 мм;
- 70 мм - при товщині металу від 4 до 10 мм;
- 100 мм - при товщині металу від 10 до 20 мм;
- 150 мм - при товщині металу від 20 до 50 мм;
- 200 мм - при товщині металу від 50 до 100 мм;
- 250 мм - при товщині металу від 100 мм.

Ширина контрольного з'єднання, яке виконане з круглого або фасонного прокату, повинна бути не менше двох діаметрів або ширини елементів.

Довжина кромek пластин визначається розмірами і кількістю зразків, що підлягають виготовленню з урахуванням повторних випробувань, припусків на ширину різку і послідуєчу обробку і з додаванням довжини ділянок шву, що не використовуються.

Розміри ділянок, що не використовуються приймають рівними:

- при ручному дуговому зварюванню покритими електродами і газовому зварюванні - не менше 20 мм на початку і не менше 30 мм у кінці шва;
- при автоматичному і полу автоматичному зварюванні з будь – яким типом захисту, крім флюсу, при товщині металу до 10 мм - не менше 15 мм на початку і не менше 30 мм у кінці шва, а при товщині металу більше 10 мм - не менше 30 мм на початку і не менше 50мм у кінці шва;
- при автоматичному зварюванні під флюсом на струмі до 1000 А - не менше 40 мм на початку і не менше 70 мм у кінці шва;

У випадку зварювання пластин з застосуванням приставних планок для виводу початку і кінця шва можна відбирати зразки по всій довжині контрольного з'єднання. Приставні планки виготовляють з того ж матеріалу, що і пластини. Довжина приставних планок повинна бути не менше розміру ділянок шву, що не використовуються.

Вирізку заготовок для зразків з проб і контрольних з'єднань рекомендується виконувати на металоріжучих верстатах. Допускається вирізати заготовки на ножицях, штампах, кисневим, електродуговим, анодно-механічною та іншими методами різання.

Припуск на величину заготовки, при якій забезпечується відсутність у робочій частині зразка металу із зміненими у результаті різання властивостями, призначається залежно від методу різання.

Мінімальне значення припуску повинно бути:

- при товщині металу до 10 мм: кисневе і плазмове різання - 3 мм, механичне, у тому числі анодно-механичне різання, - 2 мм;

- при товщині металу більше 10 и до 30 мм: кисневе різання - 4 мм, плазмове різання - 5 мм, механичне, у тому числі анодно-механичне різання, - 3 мм;

- при товщині металу більше 30 и до 50 мм: кисневе різання - 5 мм, плазмове різання - 7 мм, механичне, у тому числі анодно-механичне різання, - 3 мм;

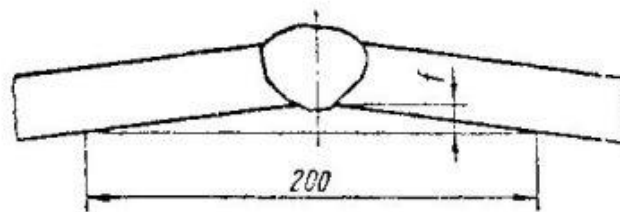
- при товщині металу більше 50 мм: кисневе різання - 6 мм, плазмове різання - 10 мм, механичне, у тому числі анодно-механичне різання, - 3 мм.

При вирізанні заготовок для зразків з металу, у якому під впливом різанням не змінюються властивості у робочій частині зразку, допускається зменшення вказаних вище припусків, но не більше, ніж у два рази.

При виготовленні зразків необхідно приймати заходи, що виключають можливість зміни властивостей металу у результаті нагріву або наклепу, що виникають при механічній обробці.

Правка контрольного з'єднання або проби, що відбирають від конструкції, яку контролюють, не допускається. Дозволяється правити готові зразки лише за межами їх робочої частини.

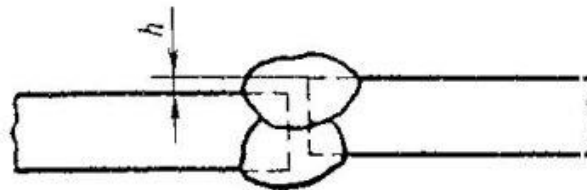
Якщо нема інших вказівок у стандартах або іншій технічній документації, то стріла прогину  $f$  на довжині 200 мм (рис. 3.1) не повинна перевищувати 10% від товщини металу, але не більше 4 мм.



Черт. 1

Рис. 3.1. Стріла прогину контрольного зразку

Вихід поверхні листів з однієї площини  $h$  у стикових з'єднаннях (рис. 3.2) не повинен перевищувати 15% від товщини листа, але не більше 4 мм.



Черт. 2

Рис. 3.2. Вихід листів стикового з'єднання з площини

### 3.3. Випробування металу різних ділянок зварного з'єднання на статичне розтягування

При випробуванні металу на статичне (короткочасне) розтягування визначають наступні характеристики механічних властивостей:

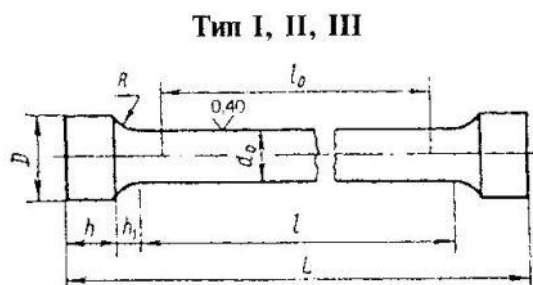
- межу текучості фізичну,  $\sigma_T$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) або межу текучості умовну  $\sigma_{0,2}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- тимчасовий опір  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- відносне подовження на розрив (на п'ятикратних зразках)  $\sigma$ , 5%;
- відносне звуження після розриву  $\varphi$ , %.

Випробування проводять для металу шва, металу різних ділянок ЗТВ наплавленого металу для усіх видів зварюванням плавленням. Форма і розміри зразків, які застосовують для випробувань, повинні відповідати рис. 3.3 і 3.4. Розміри конкретних зразків обирають з таблиць стандартів.

Допускається збільшення розміру діаметру зразка та його висоти.

Для випробувань, що проводять при нормальній або пониженій температурі, використовують зразки усіх типів. При випробуванні при підвищеній температурі використовують зразки типів IV і V.

Робочий переріз зразків усіх типів повинен повністю складатися з метал ділянки, яку випробують. В головках зразка допускається наявність металу других ділянок зварного з'єднання.



Черт. 3

Рис.3.3. Зразки на розтягування типу I, II и III

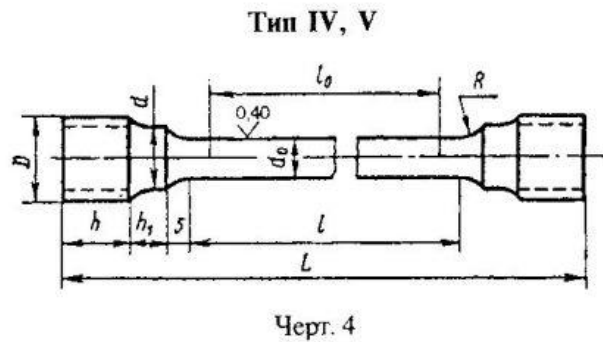


Рис.3.4. Зразки на розтягування типу IV и V

Розмітку місця вирізки зразків виконують по макрошліфам, виготовленим по торцях заготовки. Усі зразки розташовують вздовж повздовжньої осі ділянки, яка підлягає випробуванню.

При випробуванні металу шва і наплавленого металу з перетином, що перевищує перетин головки зразка, дозволяється виконувати розмітку місця вирізки зразків без травлення заготовки по зовнішньому контуру шва.

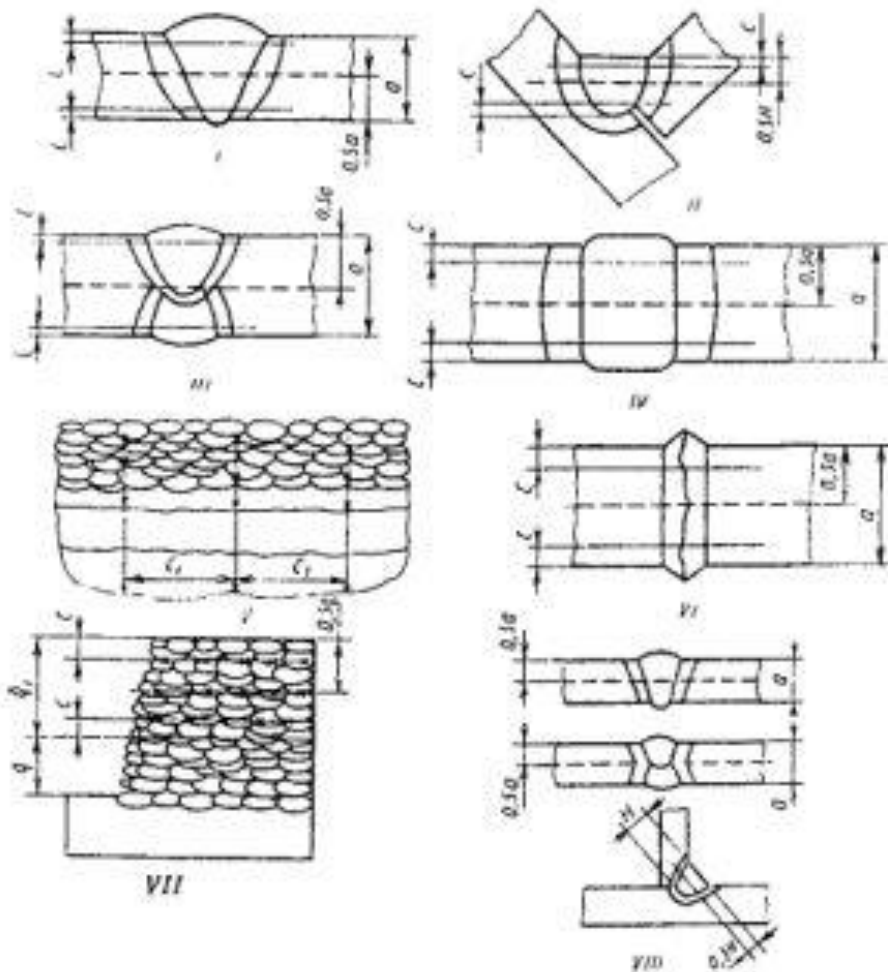
Схема розташування зразків при випробуванні других ділянок металу шва або навколошовної зони встановлюється стандартами або другою технічною документацією.

При однопрохідних швах зразки, які вирізають з різних ділянок шва, мають практично однакові механічні властивості. При багатопрохідних швах характеристики механічних властивостей у різних ділянках шва різні. Місце вирізки зразків з багатопрохідних швів оговорюються стандартами або другою технічною документацією. При відсутності спеціальних вказівок зразки вирізають у поверхні шва.

Для зварних з'єднань, виконаних з круглого прокату, схему відбору зразків зберігають такою ж. Якщо у стандартах або другій технічній документації нема інших вказівок, то при двосторонньому зварюванні зразки для випробувань вирізають з шва, виконаного другим.

### 3.4. Вимірювання твердості металу різних ділянок зварного з'єднання і наплавленого металу

Вимірювання твердості металу різних ділянок шву і ЗТВ проводиться у поперечному перетині зварного з'єднання відповідно з рис. 3.8, 3.9 і 3.10.



Примечание. Линии измерения твердости во всех случаях, кроме позиции УП, проходят через все участки сварного соединения.  $C$  — от 2 до 4 мм,  $C_1$  — от 10 до 15 мм;  $a$  — толщина основного металла, мм;  $H$  — толщина углового шва, мм;  $q$  — подготовительный участок толщиной не менее пяти слоев;  $q_1$  — участок измерения твердости толщиной не менее шести слоев. Для угловых швов, имеющих вогнутую или выпуклую поверхность, величина  $C$  отсчитывается от места максимальной вогнутости или выпуклости.

Черт. 18

Рис. 3.8. Лінії вимірювання твердості\*

\*Примітка. Лінії вимірювання твердості в усіх випадках, крім позиції VII, проходять через усі ділянки зварного з'єднання.  $C$  - от 2 до 4 мм,  $C_1$  - от 10 до 15 мм;  $a$  - товщина основного металу, мм;  $H$  - товщина кутового шва, мм;  $q$  - підготовча ділянка товщиною не менше п'яти шарів;  $q_1$  - ділянка вимірювання твердості товщиною не менше шести шарів. Для кутових швів, що мають ввігнуту або опуклу поверхню, величина  $C$  відраховується від місця максимальної ввігнутості або опуклості.

Твердість міряють по Виккерсу (HV), Бринеллю (HB) та по Роквеллу - шкалам А; В і С (HRA, HRB и HRC), віддаючи перевагу першому.

Вимірювання твердості по Виккерсу проводять по ГОСТ 2999-75. Навантаження на індентор в залежності від міцності металу ділянок зварного з'єднання і ширини зони термічного впливу повинно складати 98 Н (HV10) або 49 Н (HV50). При наявності у стандартах або другій технічній документації відповідних вказівок, проводиться вимірювання твердості по Виккерсу. Навантаження на індентор при таких замірах може змінюватися від 0,04 до 4,9 Н.

Вимірювання твердості по Бринеллю проводять у відповідності з ГОСТ 9012-59, застосовуючи сталевий шарик діаметром 2,5 або 5,0 мм.

Вимірювання твердості по Роквеллу проводять відповідно з ГОСТ 9013-59 при сфероконічному алмазному інденторі (шкала А и С) або шариковим сталевим наконечником діаметром 1,5875 мм.

Твердіть визначають для з'єднань, отриманих зварюванням плавленням або тиском зі сталей різних марок та других металевих конструкційних матеріалів товщиною не менше 1,5 мм.

Твердість основного металу, різних ділянок зони термічного впливу і металу шва вимірюють по одній або декільком ліній, вказаних на рис. 3.8. Якщо з'єднання виконано з металів різних марок, то твердість вимірюють для кожного з них.

При вимірюваннях, що виконуються у безпосередній близькості від границі сплавлення, рекомендується проводити 2 - 3 заміру у відповідності з позицією І рис. 3.9 або додаткові заміри позиції ІІ рис. 3.9. Допускається проведення замірів на ділянках зварного з'єднання, вказаних на рис. 3.10.

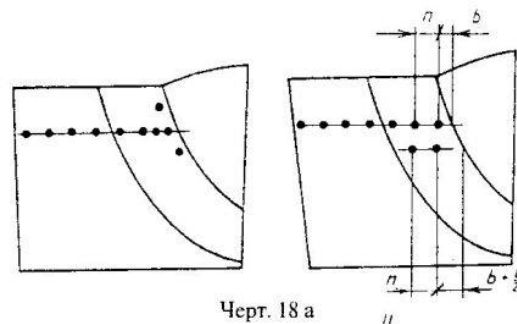


Рис. 3.9. Лінії заміру твердості поблизу лінії сплавлення



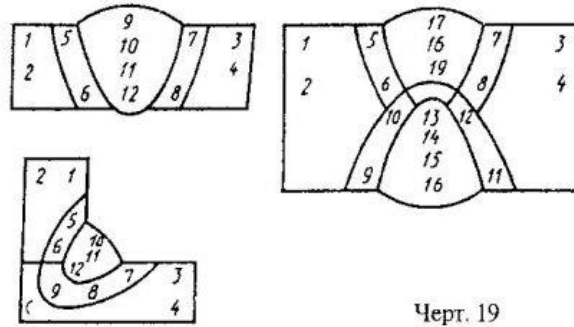


Рис. 3.10. Точки заміру твердості металу шва і ЗТВ

Вимірювання твердості по Виккерсу проводять на мікрошліфах або зразках з полірованою поверхнею, якщо контур шва видно без травлення. Шорсткість поверхні таких зразків повинна бути від 0,40 до 0,63 мкм.

Вимірювання твердості по Бринеллю або Роквеллу проводять на макрошліфах або на зразках з шліфованою поверхнею, якщо контури шва можна побачити без травлення. Шорсткість поверхні таких зразків повинна бути від 1,25 до 2,00 мкм. У зразках повинна бути дотримана паралельність робочої і опорної поверхонь.

Твердість стикових і кутових з'єднань, виконаних дуговим зварюванням вимірюють:

- при товщині основного металу або кутового шва від 1,5 до 9 мм у відповідності з позицією VIII рис. 3.8 по одній пунктирній лінії;
- при товщині від 9 до 25 мм – у відповідності з позиціями I и III рис. 3.8 по двом суцільним лініям;
- при товщині від 26 до 60 мм - у відповідності з позиціями II или III рис. 3.8 по двом суцільним і одній пунктирній лінії.

Твердість зварних з'єднань, отриманих електрошлаковим зварюванням, вимірюють у відповідності з позицією IV рис. 3.8. Кількість точок вимірів у зоні термічного впливу повинно бути не менше 10.

Твердість різних ділянок металу наплавки вимірюють у відповідності з позицією V рис. 3.8.

Твердість зварних з'єднань, отриманих зварюванням тиском, вимірюють у відповідності з позицією VI рис. 3.8.

Твердість наплавленого металу при контролі якості зварних матеріалів вимірюють у відповідності з позицією VII рис. 3.8.