

Зміст

| | |
|--|----|
| 1. Машини і прилади для визначення механічних властивостей матеріалів при статичному навантаженні..... | 1 |
| 1.1. Способи вимірювання деформацій..... | 2 |
| 1.2. Методи та прилади оцінки твердості й мікротвердості..... | 5 |
| 1.3. Методи та прилади вимірювання шорсткості поверхонь..... | 6 |
| 1.4. Методи визначення залишкових напружень..... | 6 |
| 1.5. Методи та прилади дослідження наклепування..... | 7 |
| 2. Вимірювання частоти обертання, похибки обертального руху і механічних коливань. .. | 8 |
| 2.1. Вимірювання частоти обертання..... | 8 |
| 2.2. Вимірювання відхилень обертального руху механічних передач..... | 9 |
| 2.3. Вимірювання механічних коливань..... | 10 |
| 3. Вимірювання сил та їх похідних..... | 11 |
| 3.1. Вимірювання сил..... | 11 |
| 3.2. Вимірювання крутних моментів..... | 12 |
| 4. Способи вимірювання зношення ріжучих інструментів і поверхонь деталей машин..... | 13 |
| 5. Вимірювання температури й теплоти..... | 16 |
| 6. Перевірка засобів вимірювань..... | 18 |

1. Машини і прилади для визначення механічних властивостей матеріалів при статичному навантаженні

Розрізняють машини: розривні й універсальні.

Машини розривні призначені для статичних випробувань на розтяг (наприклад, типу Р-5, цифра вказує на граничне стачне навантаження, в тон-силах) або на розтяг і стиск (наприклад, типу Р-5).

Універсальні машини для статичних випробувань (УММ-200 та ін.) призначені для механічних випробувань на розтяг, стиск, згин, згин до паралельної сторони, повзучість, релаксацію. Є також машини для статичних та циклічних випробувань розтягом–стиском або згином (МУП-100 та ін.). Допустима похибка показів силовимірювача зазвичай знаходиться в межах $\pm 1\%$ від величини вимірюваного навантаження.

Преси гідравлічні (наприклад, типу ПММ-125, цифра вказує найбільше навантаження при стисненні, в тон-силах) використовують для статичних випробувань різних зразків, конструкцій з металу та інших матеріалів на стиск, поздовжній і поперечний згин. Середня відносна похибка показів для всіх пресів становить $\pm 1\%$ від дійсного навантаження.

Для технічних і спеціальних досліджень використовують машини для статичних випробувань гвинтових пружин на стиск і розтяг, плоских пружин на згин (типу МПП-10-1 та ін), машина для випробувань дроту на скручування (типу К-5), машина для випробувань листового металу на видавлювання (типу МТЛ-10Т) та ін.

1.1. Способи вимірювання деформацій

Вимірювання деформацій зразків називають *тензометруванням*. Для тензометрування використовують датчики різних величин і ряд відповідних приладів.

Відносну деформацію визначають за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0},$$

де L_0 – відстань між двома точками на вимірюваній недеформованій ділянці; L – довжина ділянки після деформації (прикладання сили); $\varepsilon > 0$ – при розтягуванні; $\varepsilon < 0$ при стискуванні.

Величину ε вимірюють для визначення навантажень (напружень) відповідно до закону Гука

$$\sigma = \varepsilon E,$$

де E – модуль пружності матеріалу.

Шляхом впливу на пружний елемент можна вимірювати: силу, тиск, крутний момент, переміщення, прискорення і т.д.

Способи вимірювання деформацій поділяють на електричні, механічні та візуальні.

До *електричних приладів вимірювання деформацій* відносять тензорезистори. Їх застосовують для вимірювання статичних і змінних навантажень, крім вимірювань навантажень для виробів, виготовлених з гуми.

Принцип вимірювання *тензорезисторами* заснований на тому, що закріплений на деформованій поверхні тензорезистор сприймає деформації об'єкта і змінює при цьому свій електричний опір. Тензорезистор – пасивний перетворювач, тому на нього необхідно подавати постійну або змінну напругу. Чутливий елемент являє собою решітку з тонкого електричного провідника. Кращими є *фольгові тензорезистори* (товщина фольги 3 – 5 мкм) (рис. 1) для коротких решіток, а також *дротові* при складних формах решітки (розетки, ланцюжки) і високих температурах (діаметр дроту 15 – 25 мкм).

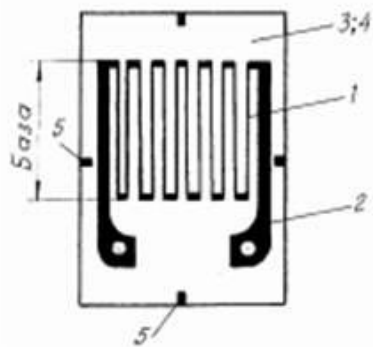
Границі застосування тензорезисторів.

- 1) максимальна деформованість $(\pm 2 - \pm 4) \cdot 10^{-2}$ м/м;
- 2) кількість циклів навантаження при максимальній амплітуді змінної деформації: $5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм – $\geq 10^9$ циклів; $1 \cdot 10^{-3}$ мм/мм – $\geq 10^7$; $3 \cdot 10^{-3}$ мм/мм – $\geq 10^5$;
- 3) динаміка 0 – 50 кГц (ударні хвилі > 500 кГц);
- 4) прискорення ≤ 160 м/с²;
- 5) температура 4,0 – 1200° К;
- 6) тиск навколишнього середовища до 10^9 Па.

Похибки при аналізі напруг при температурах $t = 0 - 40^\circ\text{C}$ становлять 1 – 5%. Похибки вимірювальних перетворювачів з тензорезисторами 0,2 – 0,5%.

Відомі також *індуктивні тензометри*. Вхідними величинами індуктивного тензометра є лінійне переміщення і кут відхилення, а вихідна величина – зміна індуктивності або змінної напруги. Діапазон вимірювання – 80% довжини котушки. Похибка вимірювання 1 – 3%. Частотний діапазон 0 – 10^4 Гц. *Переваги*: висока чутливість, простота, відсутність зношування, великі переміщення. *Недоліки*: чутливість до зовнішніх магнітних полів.

В індуктивних тензOMETрах сердечник (рис. 2) пов'язаний з рухомою опорою, а котушки складають частину корпусу тензOMETра. Ємнісні тензOMETри використовують при температурах до 700 – 750 С.

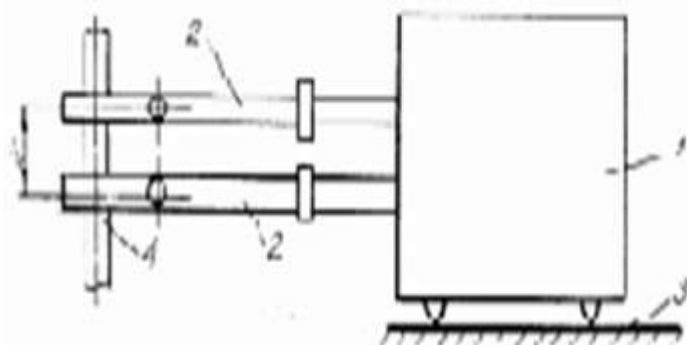


- 1 – решітки;
- 2 – виходи,
- 3, 4 – основа решітки та покриття;
- 5 – розмітка осей.

Рисунок 1. Конструктивна схема фольгового тензорезистора

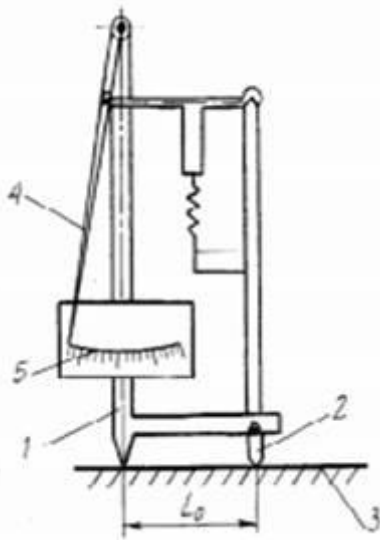
Механічні тензOMETри з важільною передачею застосовують для легкодоступних місць, якщо деформація статична. Закріплюють такі тензOMETри за допомогою притискачів (рис. 3). Перед вимірюванням деформацій тензOMETр закріплюють на об'єкті вимірювання 3. Важільна система збільшує зміни бази L_0 до 12 000 разів.

Основним недоліком тензOMETричних методів є те, що вони дозволяють тільки наближено визначити топографію напружень, оскільки щільність розміщення тензOMETрів обмежена, особливо при складній конфігурації випробовуваної деталі або при неясному розподілі напружень.



- 1 – корпус тензOMETра;
- 2 – тримачі з опорними елементами;
- 3 – стіл випробувальної машини;
- 4 – об'єкт для вимірювання деформацій.

Рисунок 2. Схема застосування індуктивного тензOMETра



- 1 – корпус з нерухомаю призмою (опорою);
- 2 – рухома призма-опора;
- 3 – вимірюваний об'єкт;
- 4 – показник;
- 5 – шкала відліку.

Рисунок 3. Схема механічного важельного тензометра

Візуальні методи (метод крихких поверхонь і поляризаційно-оптичний метод) деяким чином усувають зазначений недолік тензометричних методів. В основному їх застосовують в тих випадках, коли необхідно попередньо виявити критичні місця для того, щоб провести додаткові дослідження методами, що дозволяють отримати кількісні висновки.

При реалізації *методу крихких покриттів* на випробовуваний об'єкт наносять крихке покриття (легкоплавкі смоли, суміш крихких лаків, відлитих у вигляді стержнів) [8]. Деформація об'єкта під дією механічного навантаження супроводжується утворенням дрібних тріщин у покритті. Тріщини проявляються тільки при розтягуванні і, якщо розтягування перевищить деяке граничне значення, яке називають чутливістю крихкого покриття до тріщиноутворення ε_R . Тріщини завжди спрямовані перпендикулярно до напрямку головної деформації ε_I (або до напрямку головного напруження σ_I). Для спостереження деформацій стиснення, крихке покриття наносять на попередньо напружений об'єкт з подальшим його розвантаженням.

Метод крихких покриттів застосовують лише до статичних навантажень, а при динамічних навантаженнях – тільки до одноразового ударного навантаження. Покриття може бути використано тільки для одного випробування, а у випадку серійного випробування і для ступінчасто зростаючих навантажень. Перед кожним наступним випробуванням необхідно видалити стару плівку і нанести нову. При ступінчастому навантаженні деталі визначають останні тріщини, що появляються. З'єднуючи їх лініями, отримують траєкторію першого головного навантаження.

Поляризаційно-оптичний метод (метод фотопружності) дозволяє отримати безперервну картину розподілу напруження на поверхні випробовуваної деталі [8]. Тому він особливо придатний для знаходження слабких місць, концентрацій напружень або складних епюр навантажень в деталях зі складною конфігурацією, а також для виявлення рівчаків або тріщин і для спостереження за процесами росту тріщин або розриву. Метод придатний для дослідження статичних і періодичних динамічних процесів. Поряд з гарною видимістю розподілу навантажень на великих поверхнях є також можливість проведення досліджень на натурних елементах конструкцій, що часто забезпечує особливі переваги. Випробовуваний об'єкт повинен бути доступним спостерігачу, і його поверхня має розташовуватися перпендикулярно до приладів спостереження й освітлення. Так як фотопружність смол, починаючи з 30 С, дуже сильно змінюється, то застосування цього методу в основному обмежується кімнатною температурою.

Метод фотопружності вимагає від спостерігача знання основ теорії фотопружності та відповідного досвіду. Тому часто відмовляються від кількісної оцінки результатів випробування і замість цього обмежуються виявленням критичних місць, які потім досліджують за допомогою тензорезисторів. Це рекомендують також, якщо потрібна реєстрація або накопичення вимірних значень.

1.2. Методи та прилади оцінки твердості й мікротвердості

Твердістю називають опір матеріалу місцевій пластичній деформації, що виникає при вдавлюванні в нього твердішого тіла.

При динамічному визначенні твердості на випробовуваний зразок або виріб, діє вільно або примусово падаючий індентор (загартована сталева кулька, алмазна піраміда або конус).

Існує два способи динамічного визначення твердості за допомогою падаючого тіла:

1) визначення твердості за розмірами відбитка (методи, які використовують падіння вантажу або удар (за допомогою молотка Польді або Брінелля));

2) вимірювання висоти віддачі індентора (прилад Шора). Прилад Шора призначений в основному для визначення твердості матеріалу масивних деталей, а також дрібних деталей з металів та інших матеріалів.

Для попередньої оцінки твердості поверхневих шарів заготовок деталей машин, а також після їх термічного оброблення застосовують *метод дряпання випробовуваної поверхні* набором еталонних зразків різної твердості або жорстким (алмазним) наконечником у вигляді конуса, піраміди, півсфери, голки, леза і т.п.

Вимірювання твердості за Брінеллем рекомендують для чорних і кольорових металів з твердістю 8 – 450 одиниць. Твердість за Брінеллем (число твердості *HB*) виражають відношенням навантаження до площі поверхні сферичного відбитка, що має форму сферичного сегмента діаметром *d*. Вибір навантаження повинен бути таким, щоб $0,2 D < d < 0,6 D$.

Вимірювання твердості за Віккерсом рекомендують для чорних і кольорових металів та сплавів (у тому числі в тонких поверхневих шарах і покриттях), що мають складну форму. Твердість по Віккерсу (*HV*) визначають вдавлюванням у зразок чотиригранної алмазної піраміди з кутом між протилежними гранями, рівним 136° , і виражають числом твердості, отриманим діленням навантаження на площу поверхні пірамідального відбитка (обчислюють за довжиною діагоналей відбитка). Для спрощення визначення числа твердості за Віккерсом користуються таблицями, наведеними в ГОСТ 2999-75.

Вимірювання твердості металів за методом Віккерса здійснюють за допомогою приладів ТПП-2 і ТП-7Р-1, а за методом Брінелля – ТПШ-4 і ТШ-2М.

Визначення твердості за Роквеллом поширюється на чорні й кольорові метали і сплави. Метод відрізняється від розглянутих вище трьома особливостями:

- суміщенням операцій вдавлювання наконечника та вимірювання розмірів відбитка;
- застосуванням в якості наконечника поряд з кулькою алмазного конуса;
- число твердості за Роквеллом виражається в умовних одиницях, що відповідають різниці глибин проникнення наконечника під дією основного та попереднього навантажень.

За одиницю твердості за Роквеллом прийнята величина, яка відповідає осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм.

Метод Роквелла набув широкого застосування, оскільки він дозволяє визначати твердість швидко і просто, практично без пошкоджень випробовуваного виробу (зразка).

Для вимірювання твердості за Роквеллом застосовують універсальні прилади типу ТК (ТК-2, ТК-14-250), напівавтоматичні прилади ТКД, ТКМ, прилади для визначення поверхневої твердості ТКС-1М, ТКС-2, ТКС-14-250, переносні прилади ТКП-1, ТКП-2.

Відомі також універсальні прилади, що дозволяють визначати твердість металів як за методом Роквелла, так і за методом Брінелля: типу ТК-2М, НР250. Універсальні прилади фірми «Донау» (Швейцарія) забезпечують можливість вимірювання твердості за методами Брінелля, Віккерса (різними інденторами) і Роквелла (за різними шкалами).

Вимірювання мікротвердості вдавлюванням алмазної піраміди застосовують для тонких поверхневих шарів, а також окремих структурних складових і фаз сплавів. Для цього застосовують прилади ПМТ-3 і ПМТ-5.

Модернізований прилад ПМТ-6 дозволяє проводити визначення твердості методами дряпання і вдавлювання в широкому діапазоні навантажень від 0,03 до 2 Н.

1.3. Методи та прилади вимірювання шорсткості поверхонь

Вимірювання параметрів шорсткості *оптичними приладами* здійснюють безконтактними методами, серед яких найбільшого поширення набули методи світлового та тіньового перерізу, мікроінтерференційний із застосуванням растрів.

За принципом світлового перетину (ПСП) працюють подвійний мікроскоп МІС-11 і прилад ПСП-2, *за принципом тіньового перетину* (ПТП) працює прилад ПТП-1. Ці прилади дозволяють вимірювати нерівності поверхні висотою 0,8 ... 63 мкм при похибці показів 2,4 – 7,5 %. Обидва прилади дозволяють визначати параметри шорсткості, а також фотографувати мікронерівності в лабораторних умовах.

Мікроінтерференційний метод реалізується за допомогою приладів МП-4, МП-5, МП-15, МП-9, МП-10, призначених для лабораторних вимірювань параметрів шорсткості, а також фотографування мікронерівностей чистих поверхонь з $R_z = 0,03 \dots 1$ мкм.

Растровий вимірювальний мікроскоп ОРІМ-1 призначений для вимірювання висоти нерівностей (від 0,4 до 40 мкм) зовнішніх поверхонь деталей зі слідами оброблення, що мають певний переважаючий напрям.

При оцінюванні шорсткості поверхонь складної форми і у випадку важкого доступу до досліджуваної поверхні застосовують *метод зліпків*, який полягає в знятті копій (як правило, «негативних») з поверхонь для подальшого вимірювання по ньому висоти нерівностей. Нерівності на зліпках можна вимірювати за допомогою приладів: МІС-11, ПСП-2, електромеханічних профілографів-профілометрів. Матеріали для виготовлення зліпків – легкоплавкі сплави, віск, парафін, целулоїд, гіпс, масляна гуттаперча, кіноплівка, розчинена в ацетоні, та ін.

Щупові електромеханічні прилади, призначені для вимірювань параметрів шорсткості поверхні, називають *профілометрами*, а такі ж прилади для запису нерівностей поверхні – *профілографами*. Профілографи дозволяють не тільки записувати профіль поверхні, а й вимірювати параметри шорсткості. Тому їх називають профілографами-профілометрами.

1.4. Методи визначення залишкових напружень

Механічні методи визначення залишкових напружень отримали найбільше практичне застосування завдяки своїй простоті. До них можна віднести методи вимірювання прогинів і деформацій (для стержнів). Метод Давиденкова призначений (для тонкостінних циліндрів), метод Закса (для циліндричних деталей). Ці методи визначення залишкових напружень застосовують для деталей простої геометричної форми.

Для деталей складної конфігурації залишкові напруження в поверхневому шарі визначають за *методом звільнення*. В деякій точці деталі складної конфігурації наклеюють два дротяних тензорезистори в двох взаємно перпендикулярних напрямках і записують їх покази, а потім вирізують разом з тензорезисторами пластинку товщиною h (не вносячи додаткових залишкових напружень) і знову знімають покази тензорезисторів. Різниця показів дозволить обчислити деформації ε_1 і ε_2 у напрямках 1 і 2, які виникли в результаті вирізання пластинки (рис. 4). За значеннями ε_1 і ε_2 можна обчислити залишкові напруження σ_1 і σ_2 , що діяли вздовж напрямків 1 і 2 до вирізування пластинки. Чим тонша пластинка, тим точніше визначення σ_1 і σ_2 .

Для визначення величини і напрямку головних напружень потрібно заміряти деформації в трьох напрямках. Для цього на досліджувану поверхню наклеюють розетки дротяних тензорезисторів (рис. 4) у трьох напрямках 1, 2 і 3, які складають один з одним кути 45° або 60° .

При відомих величинах і напрямках головних напружень можна визначити нормальні й дотичні напруження у довільних площадках, використовуючи відомі залежності з теорії напруженого стану.

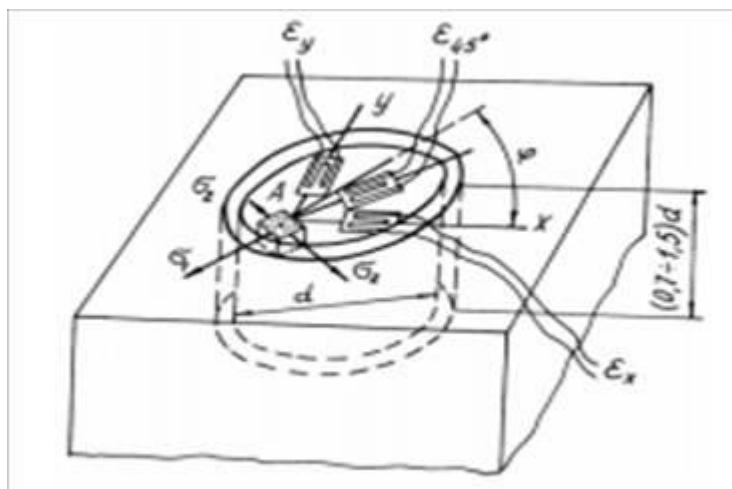


Рисунок 4. Схеми для визначення головних залишкових напружень методом звільнення

Відомі також методи визначення залишкових напружень:

– *рентгенівський метод* (використовують тільки для *матеріалів кристалічної структури* (для матеріалів некристалічної структури (скло, пластмаса) рентгенівський метод не придатний);

– *поляризаційно-оптичний метод* заснований на явищі поляризації світла і властивості більшості прозорих ізотропних матеріалів набувати під дією напруження, здатність подвійного заломлення світла. Одним із шляхів вдосконалення поляризаційно-оптичного способу дослідження напруженого стану тіл є використання *методу голографічної інтерферометрії*;

– *метод оптичночутливих (фотопружних) покриттів* (ОЧП);

– *акустичні методи* (зміна швидкості поляризованих звукових хвиль, що поширюються в твердому тілі в залежності від рівня напружень, що діють в ньому);

– *електромагнітний (магнітопружний) метод* (зміна магнітної проникності феромагнітних тіл при їх навантаженні).

1.5. Методи та прилади дослідження наклепування

Наклепування – це зміцнення матеріалу в результаті деформації. *Наклепування характеризується* глибиною проникнення, ступенем і градієнтом.

Глибину проникнення наклепування визначають шляхом вимірювання мікротвердості на косих зрізах зразків (рис. 5). Зрізи виконують в спеціальному пристосуванні, що забезпечує одержання кута $\alpha = 1 \dots 3^\circ$ на плоско-шліфувальному верстаті при достатньому охолодженні й мінімальних подачах, що виключають внесення додаткового наклепування на косий зріз. Потім виготовляють шліфзрізи. Для забезпечення чіткої границі між досліджуваною поверхнею і косим зрізом (з точки A) зразок заливають сплавом Вуда або епоксидною смолою в пристосуванні для полірування. Вимірювання мікротвердості проводять по трьох лініях. Мікротвердість на деякій відстані x_0 визначають як середнє арифметичне з трьох вимірювань. Глибину, на якій розташовані точки вимірювання мікротвердості, визначають за співвідношенням

$$h = x \sin \alpha.$$

Товщина наклепаного шару $h_n = x_0 \sin \alpha.$

Ступінь наклепування

$$U_n = \frac{H_{\max} - H}{H} \cdot 100\%.$$

Градiєнт наклепування

$$U_{\text{гр}} = \frac{H_{\max} - H}{h_n} \cdot 100\%.$$

За даними вимірювань будують графік (рис. 6), після оброблення якого отримують значення x ; h_n ; U_n ; $U_{\text{гр}}$. На основі цих показників можна зробити висновки про експлуатаційні можливості поверхні.

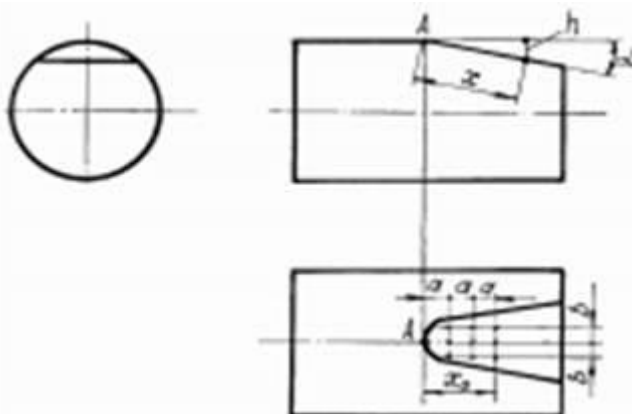


Рисунок 5. Креслення цилін-дричного зразка з косим зрізом і схема вимірювання твердості поверхні.

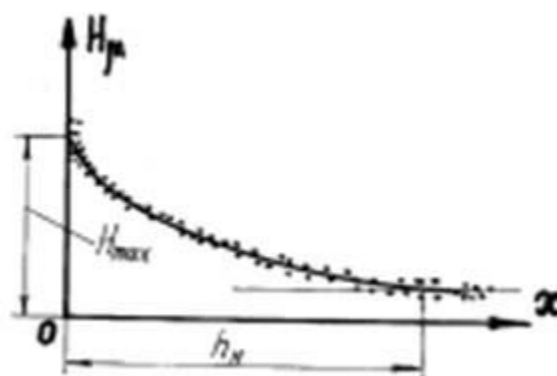


Рисунок 6. Графік зміни мікротвердості по поверхні косого зрізу.

2. Вимірювання частоти обертання, похибки обертального руху і механічних коливань.

2.1. Вимірювання частоти обертання

Механічні тахометри ділять на стаціонарні й портативні.

Стаціонарні тахометри являють собою прилади з індикацією в безпосередній близькості від об'єкта вимірювання. Їх з'єднують з об'єктами безпосередньо, або за допомогою гнучкого вала, ремінної або ланцюгової передачі. Тому виміряна величина може бути передана тільки на близьку відстань.

Відносно фізичного принципу, покладеного в основу вимірювання, є два типи механічних тахометрів: тахометр на вихровому струмі й відцентровий тахометр.

Тахометри на вихрових струмах застосовують переважно в тих випадках, коли покази повинні починатися з нуля, відповідати певному напрямку обертання і охоплювати широкий діапазон вимірювання. Похибки становлять близько $\pm 1\%$ і в найпростіших приладах досягають $\pm 3\%$ від кінцевого значення. Тахометри на вихрових струмах випускають серійно і вони розраховані для вимірювання швидкості до 5000 об/хв.

Відцентрові тахометри показують частоту обертання (покази не залежать від напрямку обертання) від деякого мінімального і до максимального значення, співвідношення яких може знаходитися в межах від 1:3 до 1:10. Похибки вимірювання менше 1%. В приладах спеціального виконання похибка складає 0,3%. Так як відцентровий тахометр являє собою коливальну систему, він повинен бути забезпечений демпфуючим пристроєм, особливо при використанні його для вимірювання низьких частот обертання. Максимальна частота обертання відцентрових тахометрів, що серійно випускають, становить 10 000 об/хв.

Значно зручніше як за можливістю використання для вимірювання різних фізичних ефектів, так і за можливістю подальшого оброблення вимірювальних сигналів є *електричні тахометри* (тахогенератори).

Загальним для всіх електричних тахометрів є можливість дистанційної передачі результатів вимірювань та їх контролю і протоколювання спільно з результатами вимірювання інших параметрів. Можливе перетворення вихідного сигналу в цифровий код, що допускає подальшу обробку в обчислювальних машинах.

Можна застосувати і *стробоскопічний спосіб вимірювання частоти обертання*. Це мобільний спосіб вимірювання, позбавлений зворотної реакції на об'єкт.

2.2. Вимірювання відхилень обертального руху механічних передач

Стосовно до зубчастих передач існують *три комплексні норми точності*:

- норма кінематичної точності;
- норма плавності роботи;
- норма контакту профілів взаємодіючих деталей.

Норма плавності роботи передачі визначає вимоги до параметрів, які впливають на кінематичну точність і проявляються багаторазово за один оберт веденої ланки. Вимоги плавності роботи особливо важливі, якщо передача є силова, так як похибки, що багаторазово проявляються за один оберт, є джерелом ударів, які призводять до появи шуму й вібрацій і, як наслідок, до зниження ККД.

Норми контакту відносять до елементів передач, які визначають величину поверхонь контакту взаємодіючих профілів елементів зачеплення.

Кінематична похибка будь-якої передачі характеризується різницею між дійсним і номінальним (розрахунковим) кутами повороту її веденого вала, відповідним однаковим кутам повороту ведучого вала. Ця різниця може виражатися в кутових одиницях, а також в одиницях довжини дуги ділильного кола веденого колеса.

Плавність роботи передачі визначають похибками, які багаторазово (циклічно) проявляються за оберт вихідного вала і становлять частину кінематичної похибки.

Дослідження зазвичай проводяться на випробувальних стендах, які забезпечують умови роботи передачі, близькі до експлуатаційних.

На основі досліджень кінематичної точності ланцюгів формують рухів верстата можна отримати величини амплітуд гармонічних складових кінематичної похибки верстата і порівняти їх з відповідними амплітудами гармонійних складових сумарної похибки оброблення, представленої відхиленнями реального профілю обробленої поверхні від номінальної.

Для отримання функції кінематичної похибки обертового шпинделя верстата, наприклад, токарного, можна також використовувати перетворювач кутових переміщень ВЕ-178А (рис. 7). Цей перетворювач можна вмонтувати в корпус вимірювального центру.

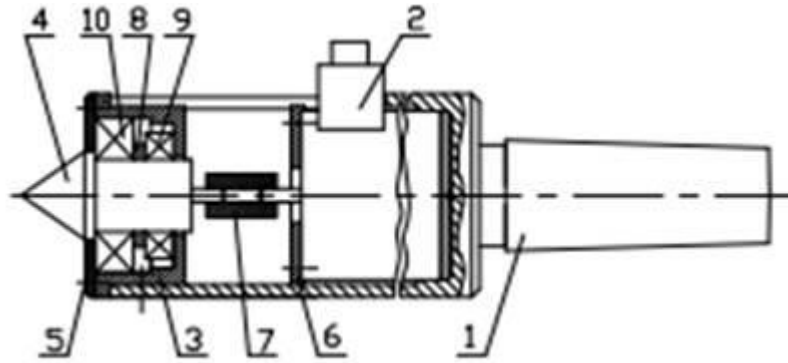


Рисунок 7. Конструктивне виконання вимірювального центру.

Вимірювальний центр містить корпус з конічним хвостовиком 1, перетворювач кутових переміщень 2 типу ВЕ-178А, опорну втулку 3, в якій розміщений центр 4, кришку 5, встановлююче кільце 6, пружну муфту 7, дистанційне кільце 8, підшипники 9 і 10.

При вимірюванні кінематичних похибок ланцюга головного робочого руху верстата, вимірювальний центр встановлюють в піноль задньої бабки і використовують як звичайний обертовий центр. Перетворювач кутових переміщень 2 з'єднують з вимірювальним комплексом. Оброблювану деталь (зразок) встановлюють в центрах і виконують її оброблення, в ході якого ведуть реєстрацію послідовності імпульсів, що генеруються вимірювальним центром. Зареєстровані послідовності імпульсів для кожної умови оброблення зразка, зберігають у вигляді окремих файлів, які потім за спеціальними програмами піддають математичній обробці та представляють у вигляді графіка кінематичної похибки верстата за один або кілька обертів його шпинделя і графіка амплітудно-частотного спектра. Результати оброблення експериментальних даних експортуються в середовище Microsoft Excel.

2.3. Вимірювання механічних коливань

Під механічним коливанням (вібрацією) розуміють зміну часу механічного руху (переміщення) в заданих границях. Сюди відносять змінні в часі рухи – прямолінійний, круговий та ін.; сили, що змінюються в часі (нормальні сили, згинальні моменти, обертальні моменти, тиск рідини, газу), а також залежні від них механічні напруження.

У коливальному процесі розрізняють:

– *детерміновані процеси*, які підпорядковуються певному закону і повторюються або можуть повторюватися в часі;

– *стохастичні (безпорядкові) процеси*, які не описуються математичною функцією, а визначаються випадковою послідовністю різних причин.

Мета вимірювання механічних коливань зводиться до отримання, за можливістю, найповнішої інформації про коливальний процес. При детермінованих процесах це завдання вирішують шляхом визначення амплітуди, частоти або положення за фазою. При стохастичних процесах можна лише шляхом «сортування» миттєвих значень за різними критеріями, обмежитися статистичними оцінками. У найпростішому випадку це зводиться до вимірювання рівня коливань.

Механічні параметри коливань, а саме вібропереміщення, віброшвидкість і віброприскорення, можуть бути виміряні за допомогою перетворювачів відносного або абсолютного переміщення.

Перетворювач відносних переміщень вимірює параметр коливань за відношенням до будь-якої зовнішньої нерухомої (опорної) точки. Він може бути різним чином з'єднаний з об'єктом вимірювання.

Для вимірювання відносних вібропереміщень в основному використовують індуктивні перетворювачі переміщення з сердечниками (для вимірювання переміщень в межах 0,1 – 300 мм) або зі щупом (для вимірювання переміщень в межах 1 – 50 мм), жорстко з'єднаних з об'єктом вимірювання.

Особливе значення для вимірювання параметрів механічних коливань (вібрацій) мають також *безконтактні вимірювальні перетворювачі*. Вони не потребують будь-якого механічного з'єднання з об'єктом вимірювання і тому працюють майже повністю без зворотнього впливу. Перевагою цих перетворювачів є те, що вони дозволяють вимірювати вібрації об'єктів, які одночасно переміщуються в різних вимірах, наприклад радіальні коливання обертових валів. Сам об'єкт вимірювання повинен бути, наскільки це можливо, виконаний з магнітного матеріалу або мати на вимірюваній поверхні покриття з такого матеріалу. Вимірювані об'єкти з немагнітного матеріалу, що володіють високою електричною провідністю, можуть бути використані для безконтактного вимірювання, однак такому способу вимірювання притаманний недолік який полягає в меншій чутливості та в підвищеній температурній залежності.

Рідше, поряд з описаними індуктивними системами для відносних вимірювань коливань, застосовують також *вимірювальні потенціометри* та *ємнісні перетворювачі*. За допомогою ємнісних перетворювачів можна безконтактно вимірювати зазори як між металевими, так і неметалевими об'єктами.

Для вимірювання віброшвидкості використовують *електричні перетворювачі з електродинамічною вимірювальною системою*. Верхня гранична частота перетворювачів віброшвидкості становить близько 1000 Гц. Значення вимірюваних віброшвидкостей знаходяться в межах 0,1 – 100 мм/с. За допомогою електронних диференціюючих й інтегруючих приладів, перетворювачі абсолютної віброшвидкості можна використовувати для вимірювання вібропереміщень і віброприскорень.

Вимірювальні перетворювачі прискорення (акселерометри) являють собою в принципі перетворювачі абсолютних переміщень. За видом електричної частини системи, їх ділять на:

– *резистивні* (працюють на прискорення приблизно до 10^4 м/с² і з частотами приблизно до 10 кГц);

– *індуктивні* (максимальні прискорення, які сприймаються індуктивними перетворювачами прискорення, складають 2500 м²/с при частоті в 2000 Гц);

– *п'єзоелектричні* (придатні для коливань високої частоти і ударних прискорень).

3. Вимірювання сил та їх похідних

3.1. Вимірювання сил

Деформацію найчастіше вимірюють описаними вище електричними, оптичними або механічними методами.

Залежно від обраного методу і діапазону вимірювання деформівний чутливий елемент (що сприймає деформацію) виконують так, що деформація відтворюється у вигляді розтягу або стиску. Пружний елемент спільно з доданими йому елементами, які виконують функції

перетворення (механічними, електричними або ін), захисним корпусом і т.д. утворює перетворювач сили (динамометр).

Серед динамометрів найбільше значення, в тому числі в якості датчиків ваги, мають електричні динамометри, а саме *тензорезисторні динамометри*. Діапазон вимірювання цих динамометрів від 5 Н до 10 МН і більше. Залежно від витрат, рівня техніки й виробничих можливостей, похибка може бути знижена до величини 0,03% і навіть 0,01%.

У найпростішому вигляді пружний чутливий елемент динамометра являє собою стержень, навантажений вздовж осі. Чутливі елементи цього типу використовують для вимірювань в діапазоні 10 кН – 5 МН.

Для вимірювання сил в меншому діапазоні (приблизно до 5 Н) і збільшення показів, застосовують чутливі елементи, в яких використовуються не поздовжні деформації, а деформації згину або зсуву. В останньому випадку застосовують консольні торсіонні чутливі елементи у вигляді плоского стержня з гострими ребрами. Хороші результати вимірювань забезпечують багатостержневі чутливі елементи, що працюють на зріз.

П'єзоелектричні динамометри застосовують для вимірювання динамічних і квазістатичних сил. Чутливими елементами в них є пластинки з п'єзокварцу. При навантаженні на їх поверхнях утворюється електричний заряд пропорційний навантаженню. Підсилювач з великим вхідним опором, підключений до чутливого елемента, перетворює заряд у відповідне електричне напруження. Так як електричний заряд виникає в момент прикладання сил, то п'єзокристалічні динамометри особливо зручні для вимірювання швидкозмінних і ударних навантажень, до того ж при підвищених температурах.

У *струнних динамометрах* феромагнітна струна розташована вздовж осі пружного пустотілого циліндра між двома зв'язаними з ними площинами, на яких розташовані точки кріплення кінців струни. При прикладанні до циліндра навантаження, спрямованого уздовж його осі, вимірюють відстань між двома згаданими вище площинами, а разом з цим змінюється і частота коливань натягнутої струни. Частота є мірою навантаження і може бути виміряна відомими способами.

Механічні динамометри застосовують лише для вимірювання статичних сил. Їх в основному використовують в двох галузях:

- а) у контрольно-випробувальній апаратурі, зокрема для перевірки випробувальних машин і захисних пристроїв на пресах (тут їх все частіше замінюють тензорезисторними динамометрами);
- б) в промислових установках для виявлення навантажувальної здатності робочих машин і т.п.

Гідравлічні динамометри можна використовувати для вимірювань з середньою точністю у важких умовах експлуатації. Такі вимірювальні пристрої допускають підключення самописних приладів.

3.2. Вимірювання крутних моментів

Тензорезисторні перетворювачі (датчики) крутного моменту знаходять широке використання для вимірювання крутного моменту. Діапазон вимірювань тензорезисторних перетворювачів крутного моменту, що серійно випускаються, становить від 0 – 0,1 Нм до 0 – 50 кНм, а в разі необхідності й більше.

Перетворювачі (датчики) крутного моменту з безконтактною передачею сигналів найефективніші для безперервного контролю, так як вони працюють практично без зношення і без обслуговування.

Індуктивні перетворювачі (датчики) крутного моменту принципово можуть бути застосовані в тих же галузях, що і тензорезисторні перетворювачі. Однак вони відрізняються підвищеною чутливістю, діапазон вимірювань знаходиться в межах від 0 – 0,1 Нсм до 0 – 100 кНм.

Струнні перетворювачі (датчики) крутного моменту випускають серійно для встановлення їх на валах діаметром 50 – 750 мм. В залежності від виробничих умов це приблизно відповідає діапазонам вимірювання крутних моментів від 0 – 100 Нм до 0 – 5 МНм. Максимальна частота обертання становить 1500 об/хв для валів малого діаметра і знижується максимум до 150 об/хв для валів великого діаметра. Клас точності самого вимірювального пристрою 0,5 – 1 %.

П'єзоелектричні перетворювачі (датчики) крутного моменту використовують п'єзоелектричний ефект в кварцових пластинках. Застосування його в основному таке ж, як у п'єзоелектричних динамометрів.

Вимірювати крутний момент можна *механічними методами*, наприклад маятниковими вагами, або *електричними методами*, наприклад, за допомогою тензорезисторів.

Випробувальні стенди, які зазвичай називають балансирними машинами, служать для визначення потужності й характеристики потужності силових машин всіх типів і використовують при експериментальних і конструкторських розробках, а також у серійному виробництві. До їх складу входять пристрої для вимірювання крутного моменту, визначення частоти обертання та інших параметрів. Залежно від конструктивного виконання й оснащення вони забезпечені пристроями для регулювання та керування, що дозволяють отримати характеристики в функції різних критеріїв. Таким чином, забезпечується можливість швидкого аналізу поведінки і процесів роботи силових машин, що випробовують на цих стендах.

4. Способи вимірювання зношення ріжучих інструментів і поверхонь деталей машин

Близько 85 ... 90 % виробів машинобудування виходять з ладу в результаті зношування і тільки 10 ... 15 % з інших причин.

Розрізняють зношування:

- механічне (абразивне, ерозійне, гідро- і газоабразивне, втомне та ін.);
- корозійно-механічне (окисне, фреттинг-корозія);
- зношування при «заїданні» спряжених пар.

Стосовно до інструментів розрізняють такі види зношування:

- абразивне;
- адгезійне (схоплювання і подальше виривання частинок і блоків);
- дифузійне (при $t = 800 \dots 850^\circ\text{C}$) шляхом деформаційного розчинення матеріалу інструменту в оброблюваному матеріалі;
- окисне (твердих сплавів) – утворюються оксиди, які мають низьку твердість і порушують монолітність твердого сплаву.

Вимірювання зношення за втратою маси або об'єму деталі використовують, як правило, при дослідженні зразків і непридатне для більшості деталей машин.

Оцінювання зношення зі зміни вихідних параметрів спряження дає лише непряме уявлення про зношення внаслідок того, що вихідні параметри спряження залежать від великого числа факторів, які неможливим оцінити повністю.

Відомий спосіб визначення зношення за вмістом продуктів зношування в мастилі. Спосіб заснований на взяття проби відпрацьованого мастила, де накопилися продукти зношування, які являють собою металеві частинки, оксиди металів і продукти хімічної взаємодії металів з активними компонентами змащувальних матеріалів. Цей спосіб дозволяє уникнути необхідності розбирання машин та їх вузлів. Його застосовують в лабораторних та експлуатаційних умовах для вимірювання інтегрального зношення вузлів різних машин, наприклад технологічного устаткування, транспортних машин, двигунів внутрішнього згорання, зубчастих передач і т.п. Точність методу визначають чутливістю приладів до вмісту в мастилі металевих домішок ($10^{-6} \dots 10^{-8}$ г/см³ мастила).

Аналіз проб мастила проводять такими методами:

– *хімічним* (визначають вміст заліза та інших продуктів зношування в золі спаленої масляної проби);

– *спектральним* (визначають вміст металевих домішок в мастилі за допомогою спектрального аналізу складу полум'я при спалюванні його проби);

– *радіометричним* (вимірювання радіоактивності продуктів зношування, які містяться в мастилі та накопичуються в масляному фільтрі). Радіоактивність матеріалу деталей створюється введенням радіоактивних ізотопів в метал при плавленні або за допомогою покриття деталей шаром з радіоактивних речовин;

– *активаційним аналізом* (вміст продуктів зношування в мастилі визначають за їх радіоактивністю за допомогою аналізу спектрів гамма-випромінювання проби після опромінення її нейтронами).

У методі *мікрометричних вимірювань* розміри деталі до і після зношування вимірюють за допомогою мікрометра, індикатора або інших приладів, точність яких зазвичай знаходиться в межах 1 ... 10 мкм. При невеликих розмірах деталі й можливості її демонтажу вимірювання зношення можна проводити за допомогою інструментального або універсального мікроскопів, оптиметра, проектора, вимірювальної машини та інших приладів. Для деталей великих розмірів, вимірювання зношення яких необхідно проводити без розбирання машини, часто розробляють спеціальні пристосування із застосуванням універсальних вимірювальних приладів.

Недоліками методу мікрометрування є неможливе здійснення вимірювання зношення в процесі роботи машини; необхідність, як правило, часткового розбирання вузла або його демонтажу; громіздкість пристосувань для безпосередніх вимірювань; неможливість при відсутності вимірювальної бази оцінювання зношення, а в ряді випадків і форми зношеної поверхні.

Різновидом мікрометричного методу вимірювання зношення є *профілографування*. При цьому можуть використовуватися два варіанти цього методу. Перший з них застосовують, коли на деталі або зразку є зношені й незношені ділянки. При знятті профілограм цих двох ділянок по висоті «уступу» можна оцінити зношення, а також зміну шорсткості поверхні.

Коли зношуються лише виступи мікронерівностей, застосовують *спосіб накладення профілограм*, знятих з однієї й тієї ж ділянки, до і після зношування. Для точного суміщення профілограм на поверхні наносять контрольну риску. При цьому можна судити не тільки про середню величину зношення, але й про збільшення площі опорної поверхні. Точність вимірювання залежить від умов контакту і похибки повторного встановлення вимірювального наконечника відносно досліджуваної поверхні, а також похибки суміщення профілограм.

Метод штучних баз полягає в тому, що на поверхню деталі наносять заглиблення строго певної форми (у вигляді конуса, піраміди і т.п.) і за зменшенням розмірів заглиблення (відбитка)

судять про її зношення. Метод штучних баз може бути використаний для вимірювання зношення тільки тих деталей, на поверхні яких допускається нанесення заглиблень.

Знаходять застосування різні варіанти розглянутого методу:

- метод відбитків;
- метод вирізаних лунок;
- метод зліпків.

При *методі відбитків* для утворення заглиблення на досліджуваній поверхні використовують алмазну чотиригранну піраміду з квадратною основою і кутом при вершині між протилежними гранями 136° (таку піраміду застосовують в приладах для визначення твердості за методом Віккерса і мікротвердості). Після вдавлювання піраміди під навантаженням вимірюють діагональ відбитка. Після зношування розмір відбитка d_0 зменшується до d_1 , і за різницею $d_0 - d_1$ оцінюють зношення $U = h_0 - h_1$. Довжину діагоналі вимірюють за допомогою оптичного вимірювального пристрою.

Метод має ряд *недоліків*: при вдавлюванні піраміди навколо відбитка утворюється опуклість за рахунок видавлювання матеріалу, в результаті чого спотворюється форма відбитка; після зняття навантаження відбувається деяке відновлення заглиблення за рахунок пружної деформації матеріалу, в результаті чого воно змінює свою початкову форму. Якщо опуклості можна видалити поліруванням, то пружного відновлення відбитка усунути не можна, що обумовлює похибку вимірювання зношення.

Метод вирізаних лунок полягає в тому, що на досліджуваній поверхні обертовим різцем вирізають лунку, за зменшенням розмірів якої при зношуванні визначають місцеве зношення.

Метод лунок має ряд суттєвих переваг перед методом відбитків:

- 1) лунку утворюють різанням, а не вдавненням, тому явища утворення опуклості матеріалу і пружного відновлення зведені до мінімуму;
- 2) співвідношення між довжиною лунки і її глибиною такі, що зменшення довжини лунки легко визначити навіть при незначному зношенні;
- 3) зусилля, необхідні для нарізування лунки, невеликі, що дозволяє створювати малогабаритні прилади для вимірювання зношення плоских, зовнішніх і внутрішніх циліндричних, а також фасонних поверхонь деталей у виробничих і лабораторних умовах.

Якщо виміряти зношення безпосередньо на деталі важко, використовують *метод негативних відбитків (зліпків)*. З поверхні деталі в тому місці, де нанесено заглиблення (зазвичай відбиток або спеціальна риска), знімають зліпок із самозатвердної маси або відбиток на пластичному металі або пластмасі. Висоту відбитка вимірюють звичайними способами і порівнюють з розміром, знятим при вторинному відтисненні зношеної поверхні.

Основою способу *поверхневої активації* є вимірювання зниження радіоактивності при зношуванні поверхні деталі, в якій на заданій ділянці створений радіоактивний шар глибиною 0,05 ... 0,4 мм шляхом опромінення ділянки поверхні або внесення в неї заряджених частинок (дейтронів, протонів, альфа-частинок). Цей спосіб придатний для визначення зношення поверхонь деталей при стендових і експлуатаційних випробуваннях без розбирання і зупинки машин. Він дозволяє оцінювати малі зношення, скорочувати тривалість випробувань, досліджувати динаміку процесу зношування, організовувати автоматизований і дистанційний контроль якості виробів.

Особливості вимірювання зношення ріжучих інструментів

Ріжучі інструменти зношуються інтенсивніше в порівнянні зі зношуванням більшості деталей машин в процесі їх експлуатації. Незалежно від геометрії зношення, мірою зношення інструменту є *лінійне і масове зношення*. При чистовому обробленні, в якості критерію

затуплення вибирають лінійне зношення. Про зношення задньої поверхні судять за максимальною шириною зони зношення δ . Для дослідження фізичної природи зношення інструментів використовують масове зношення – маса зношеної частини інструменту, яка пропорційна роботі сил тертя, витраченої на перетворення інструментального матеріалу в продукти зношування.

Вимірювання фаски зношення роблять за допомогою індикаторних пристроїв або на мікроскопі. Зношення по передній поверхні (лунку зношення) вимірюють за допомогою мікроскопа, індикаторними щупами, а також профілографуванням передньої поверхні на профілометрах–профілографах.

5. Вимірювання температури й теплоти

Найчастіше застосовують *механічні контактні термометри*. Вони мають такі переваги:

- 1) висока міцність;
- 2) висока точність;
- 3) низькі витрати на обслуговування;
- 4) низька вартість.

Механічні контактні термометри мають один істотний *недолік* – їх сигнали не можуть бути передані на значні відстані й об'єднані з іншими сигналами в інформацію, придатну для подальшої обробки. Тому в промисловій практиці температуру вимірюють в основному термометрами, дія яких заснована на зміні електричних властивостей різних речовин зі зміною температури.

Такі термометри широко застосовують для проведення лабораторних і експериментальних робіт. Покази термометра зчитують, як правило, прямо на місці вимірювання. Є варіанти виконання, в яких вимірювальний сигнал може бути переданий на деяку обмежену відстань. Їх виготовляють у вигляді температурних реле (вимикачів) або передавачів температури (вихідні сигнали можуть бути пневматичними, гідравлічними або електричними) або навіть у вигляді механічних регуляторів температури прямої дії (без підведення будь-якої допоміжної енергії).

Ділатометричні термометри часто використовують там, де потрібні великі зусилля у виконавчому механізмі, наприклад в регуляторах температури прямої дії, оскільки для компенсації температурного розширення стержня його пружним стисненням згідно закону Гука потрібно дуже велике зусилля [8].

У *біметалевих термометрах* для індикації температури використовують різне температурне розширення двох різнорідних матеріалів.

Переваги:

- 1) малі розміри в порівнянні з ділатометричними термометрами;
- 2) простота і низька вартість конструкції;
- 3) широкий діапазон вимірюваних температур (від -50° до $+600^{\circ}\text{C}$);
- 4) висока точність (похибка вимірювання від ± 1 до $\pm 3\%$).

Недоліком є те, що при температурах до 600°C їх можна застосовувати лише короткочасно.

Існують також *термоелектричні термометри (термопари)*. Всі матеріали для термопар ділять на дві групи: пари благородних металів і пари неблагородних металів.

На відміну від термоелектричних термометрів (термопар), з допомогою яких можна вимірювати лише різницю температур по відношенню до деякого відомого рівня, *термометри опору* дозволяють вимірювати і абсолютні значення температури.

Діапазон вимірювання скляних рідинних термометрів залежить від властивостей термометричної рідини.

У газовому термометрі можуть використовуватися будь-які гази, близькі до ідеального (гелій, азот, аргон). На процес вимірювання мають спотворюючий вплив багато факторів, для виключення яких необхідний ряд коригуючих заходів. Для технічних цілей газовий термометр занадто складний. Найменша температура, яку можна виміряти газовим термометром, трохи вище критичної точки газу, що використовують в термометрах (азоту – 147°C, гелію – 268°C). Верхня границя вимірювання обмежується міцністю чутливого елемента і густиною (непроникністю для газу) при високих температурах. Зазвичай можна вимірювати температури в діапазоні 125° – 500°C.

Пароконденсаційні термометри працюють за тим же принципом, що газові й рідинні. Різниця полягає в тому, що чутливий елемент тут заповнений частково рідиною, частково її парами. Тут використовують властивість кожної рідини мати свій характеристичний тиск пари, що залежить тільки від температури, а не від об'єму. Цей тиск називають тиском насиченої пари.

Вимірювальні прилади, які можуть за електромагнітним випромінюванням визначати температуру випромінюючого тіла, називають *пірометрами випромінювання* (радіаційними термометрами), або просто пірометрами. Приймач хвиль теплового випромінювання поряд з оптикою є дуже важливою складовою частиною пірометра. Розрізняють такі приймачі:

– *чорні й сірі приймачі* (термопари або болометри (термометри опору або терморезистори), закріплені на затемнених пластинках із золота або платини). Їх чутливість в основному не залежить від довжини хвилі й проявляється як в ультрафіолеті, так і в граничній інфрачервоній області спектра. Тому вони особливо придатні для вимірювання низьких температур, оскільки в цьому випадку теплова енергія випромінюється на довгих хвилях;

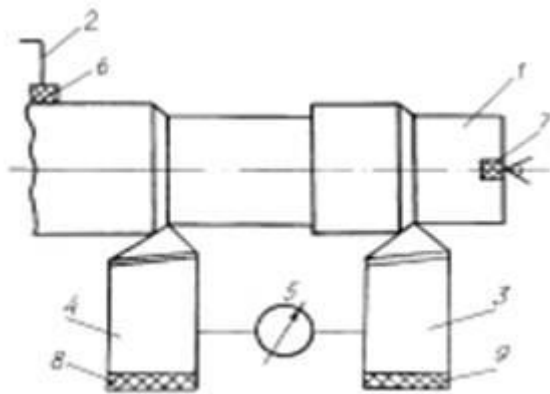
– *селективні чутливі елементи* (сенсори) (фотоелектричні приймачі випромінювання, фотоелементи, фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори).

Завданням калориметрії є експериментальне визначення впливу різних параметрів на перетворення теплової енергії (на тепловий ефект). Пристрої, в яких протікають досліджувані процеси, називають *калориметрами*. Вимірювання кількості тепла зводиться до визначення різниці температур (непрямий метод вимірювання).

При експериментальному дослідженні теплових явищ при різанні металів часто користуються *методом природної термопари*. Слід мати на увазі, що термоелектрорушійна сила природної термопари сильно спотворюється у зв'язку з наявністю паразитних термопар, що виникають в інших місцях стику досліджуваної пари з іншими деталями механізму і внаслідок цього необхідна надійна ізоляція. При зміні температур методом природної термопари вимірюють деяку середню температуру, яка не дає уявлення про справжні температури в різних точках.

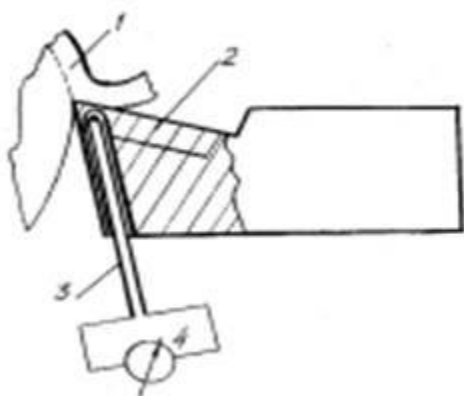
Схеми здійснення різних методів вимірювання температури різців та інших інструментів приведені нижче.

На рис. 8 представлена схема вимірювання температури різання методом двох різців. Вимірювання температури різання методом штучної термопари проводить відповідно до схеми, зображеної на рис. 9.



- 1 – оброблювана заготовка;
- 2 – патрон верстата;
- 3, 4 – різці з різнорідних інструментальних матеріалів;
- 5 – реєструючий прилад (гальванометр);
- 6, 7, 8, 9 – ізолюючі прокладки

Рисунок 8. Схема вимірювання температури різання методом двох різців



- 1 – зрізуваний шар;
- 2 – ріжучий інструмент (різець);
- 3 – штучна термопара;
- 4 – реєструючий прилад (гальванометр)

Рисунок 9. Схема вимірювання температури різання методом штучної термопари:

6. Перевірка засобів вимірювань

Метрологічну повірку засобів вимірювання здійснюють відповідно до таких правил

- повірку здійснюють з використанням зразкового (еталонного) приладу, клас точності якого в чотири – п'ять разів вище класу точності приладу, який перевіряють;
- перевірку проводять по всіх оцифрованих відмітках випробовуваного приладу при прямому і зворотному ході вимірювання;
- для кожного вимірювання визначають приведену похибку і варіацію;
- з отриманих значень варіацій і приведених похибок при прямому і зворотному ході знаходять максимальне з усіх значень і порівнюють його з класом точності приладу, що піддають перевірці. Якщо отримане значення менше класу точності, то прилад придатний до експлуатації.

Системою метрологічного нагляду називають комплекс положень, вимог та правил технічного, економічного та правового характеру, що стосуються організації метрологічного нагляду, метрологічної ревізії та метрологічної експертизи.

Завдання, які вирішуються системою метрологічного нагляду:

- забезпечення єдиності та достовірності засобів вимірювання;
- забезпечення постійної готовності засобів вимірювання;
- допомога у вдосконаленні вимірювальної техніки;
- підвищення ефективності технічних і наукових робіт.

Система метрологічного нагляду включає в себе національну метрологічну службу галузеві та відомчі метрологічні служби та служби головного метролога на підприємствах. В цілому по країні керівними і нормативними органами є Комітет метрологічного нагляду і Держстандарт.