

ЛЕКЦІЯ 4. СУТНІСТЬ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ПРОВЕДЕННЯ. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.

План лекції:

- 1. Сутність експерименту та загальні вимоги до проведення.*
- 2. Організація експериментальних досліджень.*
- 3. Методи експериментальних досліджень металургійного обладнання.*
- 4. Основні вимірвальні схеми. Тарирування датчиків.*

4.1 Сутність експерименту та загальні вимоги до проведення.

У науковому дослідженні експеримент є одним з найважливіших засобів отримання інформації про досліджуваний об'єкт. Створення нового і вдосконалення існуючого металургійного обладнання неможливо без його експериментального дослідження.

Необхідність експериментального дослідження існуючого металургійного обладнання диктується тією обставиною, що різні його види проектуються на основі дуже наближених розрахунків або теоретичних досліджень, які рясніють великою кількістю наближень, обмежень і припущень. Ці наближення вносять похибка в результати розрахунків, що тягне через собою внесення помилок в проект машини при її виготовленні. Використання даних експериментального дослідження аналогічних проєктованих машин дозволяє в значній мірі виключити помилки розрахунків і теоретичних передумов. Експериментальні дослідження металургійного обладнання дозволяють також отримати ряд даних, необхідних при проєктуванні нового та модернізації існуючого обладнання, визначення яких розрахунковим шляхом нездійснено в силу відсутності методу розрахунку цих даних.

Нарешті, дані експериментальних досліджень металургійного устаткування дозволяють створювати методи розрахунку цього обладнання з позицій його надійності і довговічності, збагачують теорію механічного обладнання.

Специфіка дослідження металургійного обладнання, яке відрізняється великою металоємністю і складною формою, полягає в тому, що більшість поставлених завдань може бути вирішено тільки з проведенням експерименту на натурному зразку, оскільки до теперішнього часу відсутні надійні критерії подібності і масштабні коефіцієнти для моделювання такого дослідження. Це ставить перед дослідником ряд питань, пов'язаних з організацією та плануванням експериментальних робіт, необхідних при виконанні комплексних науково-дослідних тем.

4.2 Організація експериментальних досліджень.

Важливу роль у забезпеченні якісного експериментального дослідження грає правильно продумана організація експериментальних робіт на всіх стадіях підготовки і проведення випробувань.

Програма досліджень повинна містити теоретичне обґрунтування експерименту з зазначенням цілей і завдань дослідження, його обсягу та умов проведення. На підставі та відповідно до програми дослідження замовляються матеріали, вибирається апаратура, складається методика дослідження, розробляються креслення пристосувань, спеціальних датчиків, проводиться налагодження та попередня тарировка апаратури, встановлюється дослідно проведення експерименту. Ретельна підготовка до дослідження в лабораторних умовах - запорука успіху виконання експериментальних робіт у виробничих умовах і всього дослідження в цілому [13].

Перший етап роботи - чітке встановлення мети експерименту. Дослідник, плануючи проведення експерименту за заздалегідь складеним планом, повинен дати собі відповідь на питання про те, що він збирається робити з отриманим результатом. Будь-який фізичний експеримент зводиться, в кінцевому підсумку до деяких вимірів, які необхідні, щоб довести, наприклад; правильність гіпотези, що висувається, знайти закон, що управляє процесом і т.д. Дослідник, отримавши очікуваний результат, повинен продумати, а чи не є він наслідком недоліків обраної методики, чи не припускає деяких інших тлумачень отриманого факту.

Таким чином, планування експерименту починається з обговорення ще не отриманого результату. Дослідник повинен чітко уявити, які однозначні висновки вдасться зробити, якщо буде отримано очікуваний результат. В роботі [5] відзначають, що нерідко після такого аналізу доводиться заново формулювати завдання дослідження та відповідно коригувати програму експерименту. При цьому дослідник повинен провести попередній кількісний аналіз експерименту. Аналіз супроводжується перерахуванням побічних явищ і оцінкою величини, що накладаються на досліджуваний об'єкт. Складання переліку можливих джерел помилки - найважливіша стадія підготовки експерименту [5]. Передбачати якомога більше джерел помилок і грубо оцінити їх за допомогою простих фізичних моделей набагато важливіше, ніж дати скрупульозний підрахунок однієї-двох помилок.

Для того, щоб експеримент був коректним, достовірним, мав гарну відтворюваність при повторенні дослідів, з необхідними чутливістю і точністю, необхідно правильно вибрати експериментальний метод дослідження. При цьому визначальним фактором є такий експериментальний результат, який потрібно отримати. Зазвичай при проведенні наукових досліджень використовують стандартні, регламентовані ГОСТ або перевірені методи експериментування. Проте, при їх використанні слід правильно обґрунтувати кількість і види випробувань, узгодити їх точність з похибками основного експерименту і переконатися в достатності одержуваної інформації. В іншому випадку дорогий трудомісткий експеримент може дати посередні, а іноді і помилкові результати [14].

Взагалі ж вибір методу досліджень визначається метою експерименту. В літературі [13] наведено перелік основних експериментальних методів, класифікованих за способом отримання інформації, стосовно до дослідження основних параметрів машин. Наведена класифікація дозволяє досліднику правильно вибрати той чи інший метод в залежності від мети і умов експерименту.

Дослідження натурних об'єктів металургійного обладнання в умовах експлуатації має свої особливості і труднощі. Ці труднощі поглиблюються при підготовці до дослідження агрегатів безперервної дії (прокатні стани, гідравлічні преси, сталеплавильні та доменні агрегати), зупинка яких на час, пов'язана з підготовкою до експерименту, є дорогою і важкоздійсненою в силу виробничих умов. З цієї причини проведення досліджень у виробничих умовах не завжди можливо і тому виникає необхідність у лабораторному експерименті, заснованому на законах теорій подібності і моделювання.

При моделюванні об'єктів необхідно правильно вибирати модельний матеріал. Наприклад, застосування для моделей полімерних і неметалічних матеріалів, відмінних від матеріалу натурального об'єкта, може привести до неправильних результатів, внаслідок відмінності в поведінку реології матеріалів моделі і природи. Досліднику слід також звертати увагу на раціональний вибір масштабу моделі. Моделі великих реальних об'єктів, а, по-друге, через невелику потужність лабораторного обладнання. В силу цих причин зазвичай використовують зменшені моделі, що тягне за собою труднощі реалізації геометричної подоби. Практикою встановлено [14], що оптимальні значення геометричного масштабу моделювання складають $1/3 - 1/10$.

Вельми часто спостерігається значне розходження результатів, отриманих при експериментах на моделі і в натурних умовах. Це пояснюють з одного боку неповним дотриманням критеріїв подібності або, як кажуть, неадекватністю моделі, а з іншого - наявністю значної різниці даних натурального експерименту.

Залежно від програми випробувань підбирається різна апаратура, що дозволяє проводити дослідження об'єктів при різних видах їх навантаження, а також при необхідності - електровимірювальна апаратура для дослідження електричних параметрів приводу машин.

Вибір схеми вимірювальної системи визначається точністю вимірювань і діапазоном вимірюваних значень параметрів, а також характером і формою отримання досвідчених даних.

Основним методом проведення експериментальних досліджень металургійного обладнання у виробничих умовах є електротензометричний метод вимірювання дротяними тензодатчиками. Тут необхідно зазначити, що натурні тензометричні дослідження обладнання пов'язані з наявністю ряду перешкод, що впливають на точність вимірювань. Наявність значних перешкод, що не залежать від тензометричної апаратури, може бути легко виявлено шляхом порівнювання тривалості робочого циклу досліджуваної машини або часу навантаження деталі з відповідною тривалістю цього процесу за осцилограмою, якщо на останній є запис електричного показника часу. Розбіжність періоду навантаження з періодом, обмеженим на плівці або папері вхідним похибок можуть бути закладені в навколишньому середовищі, самої апаратури і механічних відхиленнях в роботі машини. Гарантією відомості перешкод до мінімуму і навіть повного виключення їх є екранування всіх ліній і датчиків, раціональна розводка проводів з надійним їх кріпленням, причому, особлива увага повинна бути приділена якості монтажу, вибору місця заземлення апаратури і екранів, а також використання автономного стабілізованого живлення [13, 15, 40]. Бажаною мірою виключення наводок є припинення роботи на період вимірів джерел особливо сильних перешкод, наприклад, зварювальних

агрегатів [13].

Проведення досліджень вимагає ґрунтовної роботи з літературою. Перш ніж приступити до проведення досвіду, необхідно провести інформаційний пошук, за результатами якого уточнюються основні чинники, що визначають закономірності даного процесу і вибирається методика проведення досліду. Досліднику необхідно, по-перше, переглянути самі капітальні монографії про досліджуване явище, описи методики, розділи реферативних журналів і предметні покажчики журналів з техніки експерименту за останні 2-3 роки. Як правило, вдається знайти посилання на подібні роботи [5]. При цьому потрібно зіставити результати і висновки з даного питання, отримані різними авторами і в різний спосіб. Може вийти так, що після уважного ознайомлення з літературними джерелами доведеться відмовитись від основної ідеєю експерименту, зате в інших роботах можна виявити рішення, про які раніше дослідник не здогадувався.

Наступний етап - визначення обсягу експериментальної роботи - полягає у встановленні необхідного кількості експериментальних даних, яке має з одного боку забезпечити необхідну точність результатів, а з іншого - простоту, мінімальні вартість і час проведення випробувань.

Орієнтовний час, необхідний для проведення всіх дослідів по одній і тій же методиці, можна визначити по формулою [14]:

$$t = n \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot P_i, \quad (4.1)$$

де n – кількість серій дослідів;

m – повторюваність кожного дослід;

Питання визначення обсягу випробувань викладені в подальших розділах.

Після того, як обґрунтована ідея експерименту, його принципова схема, виявлені основні фактори, які можуть знизити результат, зазначений спосіб їх нейтралізації, обрана необхідна апаратура і визначені необхідні для неї норми точності, встановлюють послідовність проведення дослідів.

Іноді послідовність дослідів не залежить від дослідника, наприклад, для експериментів в виробничих умовах послідовність випробувань, як правило, визначає експериментатор. При проведенні експериментів використовують два види планів [14]: послідовний, якщо незалежні параметри або змінні монотонно змінюються від одного граничного значення до іншого, і рандомізований (випадковий), якщо значення незалежних змінних змінюються випадковим чином в діапазоні їх зміни. При цьому діапазон змін залежить від можливостей вимірювальної апаратури та випробувального обладнання.

Найбільш широке поширення в практиці експериментальних досліджень металургійного обладнання отримали плани послідовного типу, що дають можливість визначити особливості досліджуваних процесів. На відміну від них рандомізовані плани призводять до подорожчання і ускладнення експерименту. Разом з тим, застосування частково або повністю рандомізованих планів у багатьох випадках дозволяє уникнути систематичних помилок, викликаних особливостями апаратури, індивідуальними якостями операторів, зміною умов

проведення експерименту і т.д. [14].

Проведення експерименту неможливо без складання відповідної документації для реєстрації, перевірки і обробки первинних досвідчених даних. Основний вихідний документ будь-якого експериментального дослідження - робочий журнал, в який дослідник заносить результати вимірювань без будь-якої тимчасової роботи, основне обладнання та прилади, їх номери «клас точності і градировочние характеристики». Обов'язково слід записати дату проведення досліджень.

Надалі в журнал заносять і результати первинної обробки даних вимірювань. Більш докладно про правила ведення і оформлення робочого журналу та про обробку отриманих даних буде викладено в наступних розділах.

4.3 Методи експериментальних досліджень металургійного обладнання

У практиці експериментальних досліджень напружено-деформованого стану металургійного обладнання широкого поширення набули різні методи: електротензометричний, метод сіток, метод муарових смуг, поляризаційно-оптичний метод, метод оптично чутливих і крихких покриттів і інші. Розглянемо юільш детально основні методи.

Метод сіток. Зазвичай при дослідженнях пластичних деформацій використовують так званий метод сіток [14, 18]. Суть цього методу полягає в тому, що на досліджувану поверхню зразка наносяться прямі взаємно перпендикулярні лінії. Після навантаження сітка спотворюється, і у цьому малюнку можна углядіти якісні і навіть кількісні закономірності залишкових деформацій. Необхідно відзначити, що на початковому етапі розвитку метод сіток використовувався тільки для якісного аналізу напружено-деформованого стану. Удосконалення методики проведення експерименту і способів обробки дослідних даних, а також розвиток обчислювальної техніки дали можливість здійснити кількісний аналіз. Однак, і в даний час обробка експериментальної інформації методом сіток залишається досить трудомістким процесом, що зумовлено великою кількістю вимірювальних операцій і підготовкою даних до введення в комп'ютер, тому перспективи подальшого розвитку методу пов'язані з вирішенням проблеми автоматизації експериментальних досліджень [14]. Слід зауважити, що метод сіток використовують лише для зразків, він непридатний для вивчення поведінки деталей металургійного обладнання, так як з його допомогою можна розрізняти лише великі деформації, не менше 5%, що дуже значно. Поява таких деформацій в машині означало б аварійну ситуацію.

Метод муарових смуг. В останні роки для аналізу деформованого стану моделей і реальних конструкцій металургійного обладнання застосовують метод дослідження, споріднений методу сіток - метод муарових смуг. Цей метод відрізняється порівняльною простотою, можливістю оцінювати ступінь зміни форми без використання складних фізичних явищ і представляти всі зміни, що відбуваються з об'єктом дослідження, в розмірах переміщень, має незрівнянно більші можливості і більш широкою сферою застосувань.

В основу методу покладені муаровий ефект-своєрідна гра світлотіні, що постає перед очима, якщо покласти одну на іншу зі зрушенням або поворотом

сітки паралельних ліній, концентричні кола, точки або будь-які інші геометричні прилади [16].

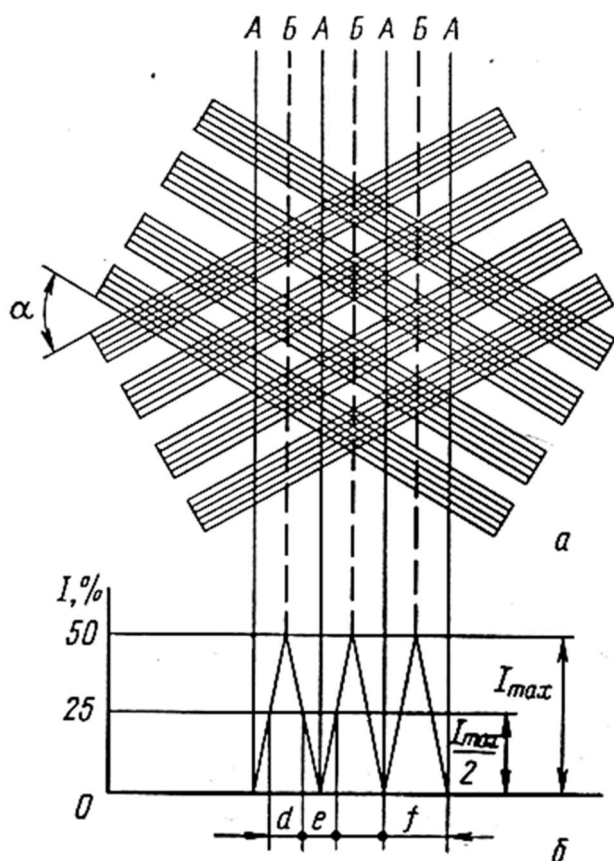


Рисунок 4.1 - Проходження світла через дві ідентичні лінійні ґрати, накладені одна на одну під кутом α : а – схема; б - розподіл інтенсивності світла

Оскільки людське око має обмежену роздільну здатність, то при певній відстані між світлими і темними лініями, що чергуються, він їх не розрізняє. Можна побачити лише сіре поле з більшою або меншою інтенсивністю потемніння в залежності від того, які лінії в ньому переважають - білі або темні. Розглядаючи закономірності появи муарових смуг в найпростішому випадку - при накладенні під деяким кутом однієї до одної сіток паралельних ліній (рис.4.1), що складаються з чорних і білих смужок рівної ширини, можна помітити, що при накладенні утворюються білі і чорні ромби, серед яких можна виділити прості чорні і подвійні чорні, що виникають при перекритті двох чорних ліній первинних решіток. При спостереженні накладених решіток уздовж лінії *A* око бачить безперервну темну смугу, а вздовж ліній *B* - безперервну світлу смугу. Центр світлої муарової смуги збігається з місцем суміщення світлих ліній обох сіток. Центр же темної смуги збігається з місцем, де темна лінія однієї з сіток закриває світлу лінію іншій. Інтенсивність світла безперервно змінюється від темної смуги до світлої залежно від того, наскільки прочинені світла лінія тієї чи іншої сітки. Таким чином, інтенсивність світла залежить від співвідношення ширини світлих і темних ліній сітки.

Розподіл середньої інтенсивності показує [14], що темна муарова смуга пропускає 12,5% падаючого світла, а світла - 37,5%. Отже, смуги складаються

переважно з чорних областей і не є чисто білими або чорними. Головна умова отримання муару полягає в тому, щоб частота сіток була менше частоти світлових хвиль. Муаровий ефект має багато спільного зі складанням коливань. Роль довжини хвилі коливань, грає крок ліній накладаються сіток, а довжини хвилі результуючих коливань - крок муарових смуг [16].

Щоб за допомогою муарового ефекту визначити деформації деталей обладнання, на них наносять сітку, яку, наприклад, фотографують до і після навантаження. Потім ці дві сітки накладають одна на іншу. При накладенні і виникає наочна картина поширення деформацій. Методи накладення сіток різні [14, 16].

Методика вимірювань за допомогою муарового ефекту відрізняється своїм чисто геометричним характером і незалежністю від фізичних властивостей матеріалу. Муаровий ефект незамінний при вимірюванні залишкових деформацій, які часто виникають в деталях металургійного обладнання, причому, їм можна користуватися при вимірюванні напружень і деформацій не тільки на всій поверхні, але і в окремих її методах (як це робиться за допомогою дротяних тензометрів), використовуючи для з цією метою муарові тензометри [12], що представляють собою накладені одна на іншу сітки невеликих розмірів: нижня деформується з деталлю, а верхня вільна (її накладають в процесі вимірювання).

Поляризаційно-оптичний метод. Для надійного судження про об'ємний напружений стан в досліджуваній деталі застосовують так званий метод фотопружності або поляризаційно-оптичний метод.

Поляризаційно-оптичний метод - експериментальний метод визначення напруженого стану деталей і конструкцій на прозорих моделях з оптично чутливих матеріалів [19]. Моделі досліджуваних деталей, зроблені зі спеціальних пластмас, особливим чином заломлюють спрямовані на них поляризовані світлові промені і світяться кольоровими візерунками напружень. Поляризованим називають світло, в якому напрямки коливань світлових хвиль впорядковані. Якщо коливання відбуваються тільки в одній площині, коли світловий вектор в процесі поширення світла залишається паралельним самому собі, світло називають плоскополяризованим. При русі кінця світлового вектора по еліпсу в площині, перпендикулярній до напрямку поширення, світло вважають еліптично поляризованим.

Для отримання поляризованого світла застосовують поляроїдні плівки, поляризаційні призми, що відображають дзеркала. В сучасних поляризаційних приладах зазвичай використовують поляроїдним плівку, вклеєну між скляними пластинами. Поляроїди можуть мати великі розміри і створюють майже повну поляризацію. Потік світлових променів після проходження через поляроїд має коливання тільки в одній площині. Якщо на шляху проходження через один поляроїд світла поставити другий поляроїд таким чином, щоб площини поляризації поляроїдів були паралельні, то світло проводить повністю. У разі взаємної перпендикулярності площин відбувається повне гасіння світла. При розташуванні поляроїдів зі схрещеними осями площин (під кутом один до одного) світло проходить частково.

Практичне застосування в дослідженнях обладнання поляризаційно-оптичного методу заснувало на такій оптичній властивості кристалів як подвійне

променезаломлення. Суть його полягає в тому, що при проходженні світла через прозору кристалічну середу світловий промінь розкладається на дві взаємно-перпендікулярні плоскополяризовані складові. Встановлено [14], що подвійне променезаломлення виникає і в деяких ізотропних матеріалах. Матеріали, що володіють такою властивістю, називають оптично чутливими.

При просвічуванні поляризованим світлом прозорою оптично ізотропною плосконапруженою моделі з напруженням в межах пружності значення відставання однієї складової світла від одної (лінійна різниця ходу), що розповсюджуються з коливаннями в площині головних напружень σ_1 та σ_2 , пропорційно товщині моделі та різниці головних напружень $\sigma_1 - \sigma_2$ в розглядаємій точці.

$$\delta = (C_1 - C_2) \cdot d \cdot (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4.2)$$

де δ – лінійна різниця хода;

C_1 та C_2 – оптичні коефіцієнти, що характеризують залежність між подвійним промінезаломленням і напруженням;

d - товщина пластини.

Це рівняння являє собою основний закон поляризаційно-оптичного методу - закон Вертгейма, який виражає кількісний зв'язок між оптичним ефектом та різницею головних напружень.

Лінійну різницю хода δ та напрям головних напружень σ_1 та σ_2 – визначають при просвічуванні плоскої моделі на спеціальному устаткуванні, що зветься полярископом. Полярископ може бути плоским і круговим, він складається з джерела світла, поляризатора і аналізатора. Полярископ може мати також систему лінз і екран. Для дослідження напруженого стану моделі її встановлюють в робочому полі полярископа між поляризатором і аналізатором. Поляризатор являє собою поляроїд, після проходження якого світло поляризується. Аналізатор- другий поляроїд, який пропускає світлові коливання тільки в одній площині.

На виході аналізатора спостерігають інтерференційну картину або в чорному, або в білому полі в залежності від розташування площин поляризації поляризатора і аналізатора. Інтерференційна картина утворюється за рахунок поєднання в одній площині зі зрушенням фаз коливань двох світлових хвиль, що виходять з моделі.

Якщо в плоскому полярископа до і після поляризатора встановити спеціальні пластинки, що створюють зрушення фаз коливань світлових хвиль на чверть довжини хвилі, то отримують кругової полярископ з круговою поляризацією світла .

Для навантаженої моделі, вміщеної в круговому полярископі з монохроматичним джерелом світла, інтенсивність світла, що проходить через аналізатор при схрещених їх осях, визначають виразом [14].

$$J = J_0 \cdot \sin \frac{\pi \cdot \delta}{\lambda}, \quad (4.3)$$

де J_0 – інтенсивність світла, що виходить з поляризатора,

λ – довжина хвилі джерела світла.

Аналіз виразу (3.3) показує, що найбільша інтенсивність світла досягається в точках, де лінійна різниця ходу δ дорівнює непарній кількості полухвиль :

$$\delta = (2n+1) \cdot \lambda/2$$

де n - ціле число.

Гасіння світла ($J=0$) відбувається в точках, де $\delta=n \cdot \lambda$. Тому на зображенні моделі в монохроматичному світлі спостерігаються світлі та темні смуги різних порядків n , що характеризуються напружений стан моделі. Розташовані на одній смугі точки мають однакову різницю ходу δ і, відповідно, однакову різницю головних нормальних напружень, тобто в них діють однакові найбільші дотичні напруження:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad (4.4)$$

Інтерференційні картини, які спостерігаються на зображенні моделі, називають ізохорами.

Інтенсивність світла, що проходить через аналізатор плоского полярископа при схрещених осях поляризатора і аналізатора, визначають виразом [14]:

$$J = J_0 \cdot \sin^2 \cdot 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot \delta}{\lambda}, \quad (4.5)$$

де β - кут між площиною поляризації променя, що вийшов з поляризатора і напрямком одного з головних в досліджуваній точці моделі.

При збігу площини поляризації поляризатора з напрямком одного з головних напружень ($2\beta = n \cdot \pi$) отримують гасіння світла незалежно від значення δ . Тому на зображенні моделі видно темні лінії, що з'єднують точки з однаковими напрямками головних напружень. Ці лінії називають ізокліни. В принципі, можна побудувати поле ізоклін для різних кутів нахилу площини коливань поляризатора і горизонтальної осі, що характеризує напрямки головних напружень в різних точках моделі.

Таким чином, в результаті поляризаційно-оптичних досліджень встановлюють в точках моделі значення різниці ходу променів δ і визначають напрям головних напружень. Потім за виразом (4.2) визначають різницю головних напружень $\sigma_1 - \sigma_2$, попередньо визначивши оптичні коефіцієнти напружень C_1 та C_2 .

Далі різними способами [20-22] здійснюють поділ головних напружень C_1 і C_2 .

До недоліків поляризаційно-оптичного методу слід віднести необхідність виготовлення моделей зі спеціальних матеріалів, які повинні мати високу прозорість, оптичну і механічну ізотропність, стабільні оптико- механічні характеристики і достатню міцність, труднощі в моделюванні умов тертя на поверхнях контакту і значну складність в обробці експериментальних даних для визначення контактних напружень. Крім того, не кожна наукова установа має

поляризаційно-оптичну установку.

Метод оптично-чутливих покриттів. Для вивчення широкого кола завдань (дослідження процесів повзучості і руйнування пружно-пластичних деформацій, оцінки температурних деформацій і напружень, динамічних процесів і т.д.) на непрозорих моделях або натурних деталях, використовують метод оптично чутливих покриттів, суть якого полягає в тому, що на поверхню досліджуваного об'єкта наносять тонкий шар оптично чутливого матеріалу, що володіє необхідними оптико-механічними властивостями. Таке покриття дозволяє застосовувати для непрозорих об'єктів поляризаційно-оптичний метод. Як матеріал покриття використовують матеріали на основі епоксидних смол або поліуретанові каучуки. До покриттів з цих матеріалів пред'являють цілий ряд вимог. З одного боку, вони повинні бути досить жорсткими, тобто мати високу оптичну чутливість за деформаціями, що необхідно для розшифровки числа смуг в металургійних областях. З іншого боку, вони повинні бути досить «м'якими», тобто володіти власними деформаціями, більшими, ніж максимальні деформації в досліджуваному процесі. Крім того, оптично чутливе покриття повинне мати мінімальну товщину і мати високу адгезію до металу.

Зазначеним вимогам найбільш повно задовольняють покриття на основі епоксидних смол, отриманих гарячою полімеризацією. Середня деформація у таких матеріалів сягає 20%, а максимальна - 30-50% [24]. Теоретичні основи методу багато в чому схожі з методом фотопружності [22].

Що стосується точності методу оптичних покриттів, то, як зазначають в [22-25], провести сувору його оцінку в загальному випадку не представляється можливим, оскільки складно врахувати всі похибки та зміну оптико-механічних характеристик в часі, вплив навколишньої сфери, характер навантаження, кваліфікація дослідника і т.д. Метод оптично-чутливих покриттів може бути успішно використаний при дослідженні напруженого стану моделей і натурних конструкцій металургійного обладнання в лабораторних і промислових умовах.

Метод крихких покриттів. Широке застосування при дослідженні напружено-деформованого стану деталей металургійного обладнання отримав так званий метод крихких покриттів [22], який забезпечує досить просте рішення певного класу інженерних задач. Суть методу полягає в тому, що на досліджувану поверхню наносять покриття із спеціально підібраними характеристиками. Завдяки необхідній адгезії покриття до поверхні об'єкта деформації, що виникають в об'єкті передаються покриттю, яке під дією напружень руйнується, припадаючи сіткою тріщин.

Метод крихких покриттів вважають неруйнівним методом дослідження напружено-деформованого стану, оскільки обрані міцності покриття значно нижче, ніж у досліджуваного матеріалу. Основними результатами випробувань є картина тріщин і послідовність їх виникнення при зміні навантаження [22].

Перевагами методу крихких покриттів є: можливість дослідження натурних об'єктів практично будь-якої конфігурації, отримання експериментальної інформації по всьому полю напружень, простота обробки первинних експериментальних даних. До недоліків методу слід віднести нестабільність одержуваних результатів, оскільки на точність вимірювань істотно впливають зміни температури і вологості в процесі випробувань, історія навантаження, а також товщина покриття і схема напружено-деформованого

стану.

Застосування методу крихких покриттів передбачає вирішення двох основних завдань [14]: встановлення зв'язку між картиною тріщин і напружено-деформованим станом покриття та визначення напружень і деформацій на поверхні об'єкта за цими даними.

Для вирішення другого завдання (перехід від картини тріщин до напруженого стану покриття) використовують теорії крихкого руйнування, наприклад, теорію Мора і максимальних відносних деформацій [22].

Як матеріали покриттів застосовують такі види покриттів як рідкі та тверді каніфольні покриття, емалеві (керамічні) плівки, різні види лаків [14, 26].

Електротензометричний метод. В якості основного методу досліджень металургійного обладнання використовують електротензометричний метод, в основу якого покладено перетворення неелектричних величин в електричні за допомогою так званих параметричних датчиків.

Ці датчики під дією сил або ж деформацій змінюють свої параметри (опір, ємність, індуктивність і т.д.), для вимірювання яких потрібно включення їх до електричних ланцюгів з джерелом електроенергії.

Відповідно до змінного параметру розрізняють ємнісні датчики, індуктивні, п'єзоелектричні і датчики опору. Кожен з перерахованих датчиків має певні переваги і недоліки, і тому вибір того чи іншого типу датчика для кожного конкретного дослідження представляє окреме завдання.

Основним елементом ємнісного датчика (рис.6.3) служить індикатор, обкладками якого є пластини з провідника на пружному корпусі за допомогою ізолятора. Зусилля P передається на корпус датчика через башмаки 2. При прикладенні навантаження корпус датчика деформується, внаслідок чого змінюється зазор Δl між обкладками 3 і тим самим змінюється ємність датчика, вимірювання якоє дозволяє визначати величину діючого навантаження.

Як матеріал для пластин використовують сплави з малими коефіцієнтами теплового розширення (інвар), для ізолюючих матеріалів - кварцове скло, яке навіть в умовах підвищеної вологості має високий опір ізоляції [14].

Ємнісні датчики мають відносно малі розміри і характеризуються малими силами тертя і протидії, що дозволяє створити датчики для всіх необхідних номінальних сил.

Певні труднощі викликає підключення ємнісних датчиків, оскільки навіть короткі обрізки кабелю мають ємності, які можна порівняти з ємністю датчика. Виникають додаткові похибки вимірювання за рахунок зміни ємності кабелю (наприклад, при температурному впливі або механічному переміщенні). Тому для отримання максимальної чутливості датчиків монтажні дроти ретельно екранують, і вибирають максимальної довжини, що не завжди зручно при виконанні вимірювань.

Ємнісні датчики прості за конструкцією, однак в багатьох випадках їх не використовують через необхідність застосування високих несучих частот, чутливість до потрапляння діоектричних речовин (води, масла і ін.), а також експлуатаційні труднощі при підключенні порівняно довгих кабелів.

Перевага їх полягає в простоті конструкції, що забезпечує роботу таких датчиків до дуже високих температур, а також в тому, що принцип вимірювань гарантує велику похибкостійкість по відношенню до сильних магнітних полів

[27-29].

В основі роботи індуктивних датчиків лежить залежність індуктивного і активного опорів котушки, що живиться змінним струмом від переміщення окремих деталей магнітопроводу [28, 29].

Принцип діє індуктивного датчику показаний на рис. 6.4. Датчик складається з роз'ємного сталевого корпусу 1, на внутрішні виступи якого одягнені котушки 2 та 3. Між виступами мається зазор ΔS , який при дприкладенні навантаження змінює свою величину за рахунок пружної деформації корпусу. Зміна зазору впливає на магнітну провідність корпусу датчика. При цьому одна з котушок живиться змінним струмом, а в другій індуктується ЕРС певної величини, що залежить, зокрема, і від величини магнітної проникності корпусу. Заміри ЕРС дозволяють судити про величину навантаження, що діє на корпус.

За допомогою ємнісних датчиків можна заміряти переміщення і сили.

До недоліків індуктивних датчиків відносять неможливість контролювати швидкоплинні процеси, їх малу чутливість і великі розміри. Крім того, стабільність вимірювань з використанням електросхем, що працюють на частоті 50 Гц, залежить від ступеня промислових електромагнітних завад, а також стабільності і форми напруги мережі.

Для замірів напружень розтягу-стиску і вигину використовують п'єзоелектричні датчики, в основу роботи яких покладено п'єзоелектричний ефект, який представляє собою здатність деяких матеріалів утворювати на гранях поверхні деталі при її механічному навантаженні електричні заряди [29]. У природі п'єзоелектричним ефектом володіють кристали кварцу і турмаліну.

Заряд на гранях пластинок, вирізаних з кристала і орієнтованих щодо його електричних осей, оцінюють п'єзомодуль d , що встановлює пропорційність між виникаючим зарядом Q і прикладеною силою P .

$$Q = d \cdot P, \quad (4.6)$$

Найбільш часто застосовуються датчики з кварцових платівок, оскільки кварц має задовільні пьезометричні властивості, дуже високий опір, відносно малу температурну залежність пьезо- і ізоляційних постійних, високу механічну міцність, великий модуль пружності, зберігає п'єзоэффект до температур 573-576 °С і до того ж значно дешевше турмаліну, який зустрічається в природі дуже рідко.

Слід зауважити, що п'єзодатчики, що працюють на вигин, мають значно більшу чутливість у порівнянні з датчиками, що працюють на стиск, проте, останні мають значно більшу міцність і діапазон частот.

При тиску на пластинах п'єзодатчиків з'являються заряди статичної електрики, які не повинні витрачатися в вимірювальній апаратурі. Датчики вимагають високої ізоляції та екранування проводів, проте завжди відбувається витік зарядів, тому п'єзодатчики не можна тарувати статистичним навантаженням.

П'єзодатчики застосовують для вимірювання швидкоплинних процесів. Вони найбільш придатні для вимірювання знакозмінних процесів. Однополярні

процеси при наявності постійної складової не фіксуються внаслідок швидкого зникнення заряду. Розглянуті типи датчиків мають різні конструкції і наведені в літературі.

Недоліки параметричних датчиків призвели до того, що при дослідженні металургійного обладнання за допомогою електротензометрії в якості основного типу датчиків використовують дротові тензодатчики провідникові. Великі можливості цих датчиків при вимірі деформацій, напружень та інших параметрів в різних деталях металургійного устаткування визначаються тим, що вони забезпечують:

- 1) незалежність напруженого стану досліджуваної деталі від установки на неї датчика завдяки малому носі і дуже малої жорсткості тензометра;
- 2) можливість контролю в різних температурних умовах самих різних за характером параметрів;
- 3) високу чутливість і точність вимірювань, а також одночасність, а при необхідності і дистанційність багатоточкових вимірювань;
- 4) можливість і простоту установки датчиків практично в будь-якій точці неспряжуваних поверхні деталі;
- 5) безперервність контролю і реєстрацію швидкозмінних процесів протягом тривалих відрізків часу.

Незважаючи на такі великі переваги і можливості електротензометричного методу, його застосування для випробування реальних конструкцій у виробничих умовах ускладнюється тим, що на час проведення підготовчих тензометричних робіт необхідно зупинити об'єкти безперервної дії, демонтувати частину обладнання, знімати з деталей всі зовнішні навантаження з моменту установки датчиків і до моменту проведення експерименту.

Крім того, великі габарити такого обладнання як прокатні стани, машини і агрегати доменного і сталеплавильного виробництва, крани, преси і т.д. викликають значні труднощі при зачистці і підготовці місць установки датчиків, ускладнюють і здорожують прокладку струмоведучих ліній. Наявність рухомих і обертових частин вимагає застосування різних струмомнімальних пристроїв. Робота деталей в найрізноманітніших температурних умовах при різних тисках зовнішнього середовища і особливо при дії побічних явищ і перешкод на датчик під час експерименту викликає необхідність прийняття спеціальних заходів щодо захисту датчиків, проводів і апаратури від цих впливів [13].

Принцип роботи дротового тензодатчика або, як його ще називають, тензорезистора, заснований на властивості металевого провідника змінювати активний опір при його деформації. Дротяний датчик представляє собою смужку тонкої підкладки (основи) довжиною $5 \div 30$ мм, шириною $2 \div 8$ мм, товщиною $0,02 \div 0,05$ мм, на яку приклеюють за допомогою спеціального клею тонкий дріт (грати) 2 діаметром $25 \div 30$ мкм, виготовлений з матеріалів з високим питомим опором (константан, ніхром, елінвар і буванс).

Підкладка електрично ізолює грати від матеріалу досліджуваної деталі, і повинна володіти гарною гнучкістю, механічною міцністю, вологостійкістю, ізоляційними властивостями, високою стабільністю властивостей в заданому температурному інтервалі, відсутністю повзучості. Відповідно до цих вимог в якості основи для тензорезисторів використовують креслярський прозорий і цигарковий папір, плівки, виготовлені з клеїв, що полімеризуються або лаків

(наприклад, клей БФ 2, ВС-10Т, електроізоляційний лак ВЛ-931, циакрін і спеціальні композиції) [14].

При проведенні тривалих випробувань статичних деформацій рекомендують застосовувати тензорезистори на плівковій основі, так як вона характеризується стабільністю показань тензорезисторів в часі, а її повзучість в 2-3 рази менше, ніж паперової [14].

При кріпленні датчика на досліджувану деталь, яку піддаються навантаженню і, отже, деформації, останнього омичний опір (за рахунок зміни геометричних розмірів і фізичних властивостей). Опір дроту датчика провідника довжиною l , площею поперечного перерізу F і питомим опором ρ визначається виразом

$$R = \rho \frac{l}{F} \quad (4.7)$$

Зміна питомого опору провідника під дією розтягуючих або стискаючих деформацій називають тензорезективним ефектом [14]. Він характеризується тензочутливістю, яка встановлює зв'язок між відносною зміною опору і відносною деформацією в напрямку вимірювань.

Коефіцієнт тензочутливості (відносна чутливість) датчика визначається виразом:

$$\gamma = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta l/l}, \quad (4.8)$$

де:

μ - коефіцієнт Пуасона;

$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$, - відносне подовження.

Наближена величина γ може бути визначена з виразу:

$$\gamma = 1 + 2\mu, \quad (4.9)$$

розрахована за цим виразом відносна чутливість датчика дає величину (при $\mu=0,3 \div 0,5$) $\gamma = 1,6 \div 2,0$.

Практично відносна чутливість датчиків до деформації має відхилення від зазначеної величини в більшу або меншу сторони, досягаючи значень $3 \div 3,5$. Значення $\gamma < 1,6$ не бажано, так як основною вимогою до дротяного датчика є можливо більшого значення відносної чутливості.

Відмінність значень відносної чутливості, визначеної експериментальним шляхом, від значень, отриманих розрахунковим шляхом, пояснюється зміною питомого опору дроту датчика при деформації. Дротові датчики змінюють свій опір також і при зміні температури навколишнього простору або деталі, на якій вони закріплені. Зміна їх опору залежить від коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу досліджуваної деталі і матеріалу дроту датчика, а також від її температурного коефіцієнта опору.

У більшості розроблених методів тензометрирования в різних

температурних умовах застосовують кріплення датчиків шляхом приклеювання їх на місце, установки після ретельної зачистки і знежирення поверхні деталей. Приклеюку здійснюють різними клеями і складами [14], що зазвичай вимагає тривалої сушки або термообробки місцевим підігрівом за допомогою підігрівачів різних конструкцій. Виконання місцевого підігріву на великогабаритному металургійному устаткуванні вельми складно, а іноді і взагалі нездійсненно. Крім того, це призводить до порушення необхідного для сушіння датчиків одноманітного температурного режиму. З метою уникнення зазначених незручностей в практиці тензометрирования використовують датчики на підкладці з металевій фольги, призначені для тривалого тензометрирования при підвищених температурах ($400-800^{\circ}\text{C}$) і встановлюються на досліджувані деталі за допомогою контактної електрозварювання [13, 30]. Для отримання теплових характеристик датчиків на металевій основі проводять їх попередню тарировку в умовах відповідного температурного поля [14]. Можливість скорочення термінів установки датчиків і монтажу струмоведучих проводів без зниження якості дослідження, а також висока стабільність показників датчиків на металевій підкладці забезпечили їм широке застосування при дослідженні металургійного обладнання.

Однією з основних характеристик тензодатчика є його база L (рис. 7.5). По довжині бази L тензодатчики умовно можна розділити на три групи: з малою ($L = 6 \text{ мм}$), середньою ($L = 10 \div 30 \text{ мм}$) і великою ($L > 30 \text{ мм}$) базами. Найбільш широко поширені тензодатчики з базою $1 \div 20 \text{ мм}$. У тензовимірjuвальній практиці прийняті опори 50, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400 і 600 Ом [14]. Виводи для різних датчиків різні і складають $10 \div 80 \text{ мм}$. Для надійного контакту виводи приварюються або припаюються до кінців решітки.

Часто при проведенні досліджень використовують багатоеlementні тензодатчики (розетки), які утворюються з двох, трьох або чотирьох лінійних тензочуттєвих елементів, об'єднаних спільною основою (рис. 7.6).

В даний час при проведенні тензометричних досліджень металургійного устаткування широке застосування отримали фольгові тензодатчики (рис. 7.7), у яких решітка виконана з фольги товщиною $2 \div 10 \text{ мкм}$. В якості основи у цих датчиків використовують плівку з синтетичної смоли, а також папір, просочений клеєм. Фольгові тензодатчики покращують передачу деформації до чутливої решітці, підвищують стабільність і надійність проведених вимірювань.

Крім того, фольгові тензодатчики добре розсіюють тепло, що дозволяє значно збільшити струм, що живить мостову схему, підвищити її чутливість, а також розширити діапазон робочих температур [14].

При вимірі малих деформацій досить часто застосовують напівпровідникові тензодатчики, в якості чутливого провідника використовують монокристалічний провідник з германію або кремній [31].

Відносна чутливість також залежить від виду і кількості домішок в кристалі і змінюється від 100 до 200 і вище, що дозволяє отримати на виході схеми сигнал, який не потребує посилення.

Основна відмінність напівпровідникових тензодатчиків від дротяних складається в зміні їх питомої опору при деформації [14]. Зміни опору в результаті коливання температури у напівпровідникових тензодатчиків набагато вище, ніж у дротяних і фольгових. Тому при дослідженні деформацій

напівпровідниковими тензодатчиками навіть невелика зміна температури тягне велику похибку.

4.4 Основні вимірювальні схеми. Тарирування датчиків

При експериментальних дослідженнях металургійного обладнання електротензометричним методом використовують, як правило, дві схеми: потенціометричну і мостову .

Потенціометрична схема складається з джерела живлення U_n , послідовно з'єднаних тензодатчика R_1 і так званого баластного опору R_2 . При зміні опору тензодатчика між його крайніми точками крім постійної напруги U з'являється змінна напруга ΔU , відповідна зміні опору тензодатчика ($\Delta U \leq U$). Для виключення на виході схеми постійної складової напруги U і для реєстрації ΔU чутливий вимірювальний прилад підключають до тензодатчиками через конденсатор C який повністю затримує постійну складову U і пропускає змінну ΔU .

Потенціометрична схема застосовується в основному для вимірювання динамічних деформацій, де використовуються підсилювачі змінного струму, що реагують тільки на зміну ΔU . При цьому деформації визначають в межах 2-10% [14].

Однак, найбільше поширення при дослідженні напруженого стану металургійного обладнання знаходить мостова схема, яка дозволяє з високою точністю визначати зміну опорів і враховує необхідність температурної компенсації. Схема виконана у вигляді рівноплечого моста - міст Уітстона, - що складається з окремих опорів і має зазвичай вид ромба, сторони якого називають плечима. Схема включає робочий датчик, компенсаційний датчик і два неробочі датчика, опори всіх датчиків рівні один одному і мають величину R . Робочий датчик закріплюють на випробуваній деталі так, щоб він сприймав її деформації при навантаженні. Компенсаційний датчик кріплять в зоні робочого, але так, щоб на нього не передавалися деформації деталі, а температурні умови були б такі ж, як і у робочого датчика. Неробочі датчики кріплять в одному із зручних (при випробуваннях) місці, але так, щоб в процесі випробувань вони не зазнавали деформацій, і температура їх була однаковою [32].

Принцип роботи вимірювального рівноплечового моста полягає в наступному.

При підключенні точок 1, 2 до джерела струму через плечі моста 1-3, 3-2 і 1-4, 4-2 потече струм I . Так як всі плечі моста до навантаження досліджуваної деталі мають однаковий опір R , то падіння напруги на кожному плечі буде однаковим і дорівнювати за величиною $U = I \cdot R$. Тому потенціали крайніх точок вертикальної діагоналі моста 3,4 будуть однаковими і підключений до цих крапок вимірювальний прилад типу гальванометр не даватиме свідчень (тобто $U = 0$). Коли напруга на виході моста дорівнює нулю, незважаючи на наявність напруги на вході, і міст знаходиться в стані електричного рівноваги, говорять, що міст збалансований. У разі, коли на виході моста різниця потенціалів не дорівнює нулю і через вимірювальний ланцюг проходить струм, міст називають невривноваженим або незбалансованим [14].

При навантаженні досліджуваної деталі остання деформується, деформуючи при цьому робочий датчик, який одержує внаслідок цього збільшення опору $\pm \Delta R$. Збільшення опору робочого датчика призводить до збільшення падіння напруги на ньому, внаслідок чого потенціал точки 3 вертикальної діагоналі моста одержить збільшення $\pm \Delta U$.

Різниця потенціалів між точками 3, 4, що виникне, викличе в вимірювальному приладі струм, пропорційний величині ΔU . Так як ΔU пропорційна збільшенню опору перетворювача ΔR , а останній пропорційній відносній деформації досліджуваної деталі, то показання вимірювального приладу (гальванометра) будуть пропорційні цій деформації або ж з чинним на деталь зусиллю, а також напрузі, що в ній виникають.

Виключення впливу зміни температури робочого датчика на вимірювання здійснює компенсаційний датчик. Робота схеми в цьому випадку полягає в наступному [32].

При зміні температури робочого датчика він бере зріст опору ΔR_r . При цьому таке ж збільшення опору отримує і компенсаційний датчик, так як він закріплений в місці з такими ж температурними умовами, як і робочий.

Оскільки обидва ці датчика отримують при зміні температури однакові збільшення опору, то потенціал точки 3 щодо точки 4 схеми не зміниться і реєструючий прилад не дасть показань.

Отриманий ще допомогою реєструючого приладу запис досліджуваного параметра дає можливість визначити не тільки характер вимірювання, але і його абсолютні величини для заданих моментів часу. Абсолютні величини досліджуваного параметра: зусилля, напруження, крутний момент і ін. можуть бути отримані після відшукування масштабу запису, отриманого реєструвальним приладом.

Відшукування масштабу запису носить назву тарування (градування) досліджуваного параметра. Існує два способи тарування: прямий і непрямий.

При прямому способі тарування в разі кріплення датчика безпосередньо на випробувану деталь, остання повинна навантажуватись відомими навантаженнями з фіксуванням відхилень реєструючого приладу. За цим величинам будується тарувальний графік, на якому по горизонтальній осі відкладені величини відхилень реєструючого приладу X , а по вертикальній - відповідні навантаження P (рис. 7.16).

Масштаб досліджуваного параметра визначають з тарувального графіка при лінійній залежності X від P :

$$m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (4.10)$$

При непрямому способі тарування зазвичай застосовують тарувального пристрій у вигляді так званої тарувальної балки (рис 7.17), що представляє собою закріплений брус рівного опору вигину I з закріпленими на ньому дротяними тензодатчиками 2, які дозволяють отримувати контрольований одновісний напружений стан.

При навантаженні балки вантажем P в її крайніх волокнах виникають

напруження, а, отже, і деформації, які сприймаються датчиками. Вантажі P підбирають в залежності від параметрів балки так, щоб величини напружень виражалися повними числами.

Ширину бруса в приймають рівною $20 \div 30$ мм, що дозволяє здійснювати наклейку декількох датчиків. Висоту бруса H приймають рівною $8 \div 10$ мм, що дозволяє усунути помилки, що вносяться товщиною клею і іншими факторами [14].

Точність відтворення деформацією на тарувальному пристрої залежить від толщини виготовлення бруса.

З огляду на те, що балка рівного опору і напруження по всій її довжині однакові, то місце наклейки датчиків може бути будь-яким. Самі ж датчики і схема вимірювань, коефіцієнт підсилення і реєструючий прилад повинні бути точно такими ж, як і при випробуванні елемента машини. За даними вантажів P і величинам відхилення реєструючого приладу будують тарувальний графік, аналогічний попередньому і обчислюють масштабний коефіцієнт. При цьому мають на увазі, що кожного вантажу P відповідає певна величина напруження і тому масштабний коефіцієнт, обчислений таким способом, відразу дає можливість визначення напружень в випробуваної деталі, а по її розмірам може бути вже визначено і діюче на неї зусилля. При тарування визначають також коефіцієнт тензочутливості датчика, використовуючи вираз (4.8).

Величину відносного подовження E для бруса рівного опору визначають залежністю:

$$E = \frac{12P \cdot l \cdot h}{E \cdot b \cdot H^3} \quad (4.11)$$

де P — зусилля на балці;

l — плече прикладання сили;

h — відстань від нейтральної вісі балки до ґратки датчика;

b — ширина балки;

H — висота балки;

E — модуль пружності матеріала.

Питання для самоперевірки

1. Сутність експерименту та загальні вимоги до проведення.
2. Етапи експериментальних досліджень.
3. ЕлектротензOMETричний метод експериментальних досліджень.
4. Метод сіток.
5. Метод муарових смуг.
6. Поляризаційно-оптичний метод.
7. Метод оптично чутливих і крихких покриттів.
8. Основні вимірювальні схеми.
9. Тарування датчиків.