

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. О. Стрижало
М. В. Бородій

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ

В МЕХАНІЦІ ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

УДК 521+620.1.05

Рецензент *Піскунов С.О. , д.т.н., професор,
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний редактор *Бородій М.В., д.т.н.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 1 від 02.09.2022 р.)
за поданням Вченої ради навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту
(протокол № 1 від 01.09.2022 р.)*

В навчальному посібнику викладені методи використання засобів експерименту у сукупності з відповідною нормативною документацією для вирішення таких практичних задач, як: дослідження механічної поведінки та міцності матеріалів і конструкцій за дії зовнішніх навантажень; обробки та представлення результатів експерименту.

Призначений для здобувачів освітнього ступеня магістра за спеціальністю 131 Прикладна механіка, може бути також корисним для інших спеціальностей, викладачам при підготовці практичних та лабораторних занять.

Реєстр. № НП 22/23-003. Обсяг 13,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.О.Стрижало, М.В. Бородій
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ВСТУП

Фундаментом і основою механіки деформівного твердого тіла є експеримент, на базі якого формуються її теорії і гіпотези, і який використовується для перевірки їх адекватності і достовірності. Експериментальні методи є основою для формування і розробки визначальних співвідношень в усіх складових механіки деформівного твердого тіла, а саме, в теоріях пружності, в'язкопружності, пластичності, повзучості, а також в механіці руйнування і теорії втомного руйнування. Без знання експериментальних методів неможливо вирішувати практично важливі проблеми обґрунтування методів розрахунку напружено-деформованого і граничних станів реальних конструкцій.

Курс лекцій «Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла» є навчальною дисципліною, в якій викладаються методи, завданням яких є формування розрахункових моделей, рівнянь стану та критеріїв на основі макроексперименту. Тому вивчення курсу базується на широкому використанні методів механіки деформівного твердого тіла, теорії подібності і розмірностей, а також змісту курсів по металознавству, опору матеріалів, метрології.

Метою навчального посібника є надання студентам знань з основних теоретичних і практичних принципів постановки сучасного експерименту, побудови обладнання, вимірювальних схем, систем автоматизації; практичних навичок проведення експерименту та вміння раціонально і грамотно використовувати експериментальне обладнання для визначення механічних характеристик матеріалів і вивчення закономірностей їх деформування і руйнування.

В навчальному посібнику викладені методи використання засобів експерименту у сукупності з відповідною нормативною документацією для вирішення таких практичних задач, таких як: дослідження механічної поведінки та міцності матеріалів і конструкцій за дії зовнішніх навантажень; обробки та представлення результатів експерименту.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за освітньою програмою ОКР магістр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», може бути також корисним студентам, інших спеціальностей, викладачам і аспірантам, професійна діяльність яких пов'язана з експериментальними дослідженнями матеріалів та процесів.

ЗМІСТ

1	Визначення, історія розвитку та класифікація експериментальних методів...	7
1.1	Основні поняття.....	7
1.2	Макроексперимент.....	8
1.3	Історія розвитку експериментальних методів.....	9
1.4	Класифікація експериментальних методів.....	13
1.4.1	За цільовими ознаками.....	13
1.4.2	За видом напруженого стану.....	14
1.4.3	За характером впливу зовнішнього навантаження.....	14
1.4.4	За температурою випробувань.....	15
1.4.5	За природою навантажень.....	15
	Контрольні запитання за розділом 1.....	16
2	Визначення характеристик механічних властивостей конструкційних матеріалів. Об'єкти дослідження	17
2.1	Планування експерименту.....	17
2.1.1	Основні етапи під час проведення експерименту.....	17
2.1.2	Основні принципи планування експерименту.....	18
2.1.3	Типи експериментів.....	18
2.1.4	Плани експерименту.....	19
2.1.5	Факторні плани	21
2.2	Випробувальні системи із замкнутим контуром регулювання	23
2.3	Об'єкти дослідження	24
2.3.1	Випробування на розтяг	25
2.3.2	Зразки для випробування на розтяг.....	26
2.4	Методи визначення характеристик міцності, пластичності і пружності за розтягу, стисненні, зсуву і крученні, згину, повзучості, втоми, складного напруженого стану	27
2.4.1	Механічні характеристики міцності, які визначаються за випробування на розтяг, і методи їх визначення	27
2.4.2	Випробування на стиск та згин	44
2.4.3	Випробування на кручення, визначення характеристик зсуву	50
2.4.4	Випробування на ударний згин	58
2.4.5	Випробування на повзучість та довготривалу міцність	61
2.4.6	Випробування на втому	69
2.4.7	Випробування за складного напруженого стану	85
2.5	Методи визначення характеристик в'язкості руйнування	95
2.5.1	Визначення характеристик тріщиностійкості	95
2.5.2	Зразки та діаграма розкриття тріщини для визначення характеристик тріщиностійкості	102
2.5.3	Експериментальне визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень та J-інтеграла Черепанова-Райса	108
	Контрольні запитання за розділом 2.....	116
3	Системи силонавантаження. Експериментальні комплекси для механічних	

випробувань	118
3.1 Класифікація систем силонавантаження обладнання для визначення механічних характеристик металів і сплавів	118
3.2 Машини для статичних випробувань	123
3.2.1 Машини з механічним приводом	123
3.2.2 Машини з гідравлічними перетворювачами	125
3.2.3 Машини із гідромеханічним приводом	130
3.3 Особливості випробувань за тривалого статичного навантаження	132
3.3.1 Випробування за тривалого статичного навантаження	132
3.3.2 Пристрої для випробувань на повзучість та тривалу міцність	135
3.3.3 Пристрої та установки для випробування на релаксацію напружень	139
3.4 Пристрої і копри для випробування при одноразовому динамічному навантаженні	145
3.4.1 Особливості випробувань за динамічного навантаження.....	145
3.4.2 Установки з гідравлічними, пневматичними та магніто-імпульсними перетворювачами	148
3.4.3 Маятникові, ротаційні та вертикальні копри	153
3.4.4 Пневмопорохові копри	159
Контрольні запитання за розділом 3.....	163
4 Методи дослідження напружень і деформацій	164
4.1 Класифікація методів дослідження напружено-деформованого стану	164
4.1.1 Класифікація методів вимірювання	164
4.1.2 Рентгенографічні методи вимірювання деформацій	165
4.1.3 Поляризаційно-оптичні методи	167
4.1.4 Метод оптично чутливих покриттів	173
4.1.5 Метод крихких покриттів	177
4.1.6 Метод гальванічних покриттів	181
4.1.7 Метод сіток	184
4.1.8 Метод ліній ковзання	190
4.1.9 Метод муарових смуг	191
4.1.10 Метод голографічної інтерферометрії	197
4.1.11 Метод спекл-інтерферометрії	202
4.1.12 Тіньовий оптичний метод «Каустик»	202
4.1.13 Метод термографії	204
4.2 Засоби вимірювання, засновані на перетворенні деформації поверхні	205
4.2.1 Класифікація тензометрів	205
4.2.2 Дротяні, фольгові і напівпровідникові тензорезистори; коефіцієнт тензочутливості	222
4.3 Вимірювальні схеми, тензометрична апаратура, автоматизація і індикація вимірювань	230
4.3.1 Основні вимірювальні схеми тензометричної апаратури	230
4.3.2 Тарування тензорезисторів, клеї і методи наклеювання тензорезисторів, температурна компенсація похибок вимірювання	232
4.3.3 Тензометричні перетворювачі механічних величин, тензометрична апаратура	237

4.4 Автоматизація керування випробувальним обладнанням	245
4.4.1 Автоматизація вимірювань	245
4.4.2 Автоматизація керування експериментальними установками	252
Контрольні запитання за розділом 4.....	258
5 Методи дослідження міцності матеріалів і елементів конструкцій за дії середовищ і температур	260
5.1 Дослідження впливу середовищ (нейтральних і агресивних) на міцність і довговічність	260
5.2 Експериментальні методи дослідження при високих (до 3000К) і низьких (від 1,5К) температурах	262
5.2.1 Методи нагріву за високих температур	262
5.2.2 Камери для дослідження при високих і низьких температурах, методи охолодження	272
5.3 Методи і засоби вимірювання температури	281
Контрольні запитання за розділом 5.....	288
6 Аналіз, обробка і подання результатів експерименту	290
6.1 Характеристики точності і похибки вимірювання	290
6.2 Визначення середніх значень вимірюваних величин, аналіз результатів, і підготовка звіту за результатами експерименту	294
Контрольні запитання за розділом 6.....	302
Посилання.....	303

1 ВИЗНАЧЕННЯ, ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ

1.1 Основні поняття

Механіка деформівного твердого тіла (МДТТ) є складовою частиною механіки суцільного середовища і представляє собою феноменологічну теорію, в рамках якої дається математичний опис сукупності дослідних фактів, які встановлюються для твердих тіл у процесі макроексперименту.

Механіка деформівного твердого тіла включає: теорії пружності, в'язкопружності, пластичності, в'язкопластичності, повзучості, втоми і механіки руйнування. Практичні задачі, що нею вирішуються пов'язані з розробкою методів розрахунку напружено-деформованого стану елементів машин та споруд та з розробкою методів їх розрахунку на міцність, стійкість та довговічність.

Експериментом називається метод пізнання, за допомогою якого в контрольованих та керованих умовах досліджуються явища дійсності (природи). Експеримент характеризується тим, що в процесі його постановки та проведення об'єкт, що вивчається, піддається активному і контрольованому впливу. Цим він відрізняється, наприклад, від спостереження, у якому дослідник може лише фіксувати зміни у досліджуваному об'єкті, не надаючи жодного впливу на характер його взаємодії з іншими об'єктами і довкіллям.

Експериментальні дослідження становлять основу наукових теорій, у той же час головним завданням експерименту найчастіше є перевірка основних гіпотез та передбачень теорії. Це добре розуміли вчені на ранніх стадіях розвитку механіки. Так, геніальний Леонардо да Вінчі ще на межі XV і XVI століть писав: *«Практика останній критерій наукової теорії. Мені здається, що ті науки недосконалі і сповнені помилок, які не народжуються з експерименту – матері будь-якої достовірності і які не закінчуються на експерименті»*.

Всі теорії механіки деформівного твердого тіла, так само, як і інші розділи знань, базуються на експерименті, на фактах дослідного походження. Тому експериментальні дослідження мають визначальне значення у їх формуванні та обґрунтуванні.

1.2 Макроексперимент

Механічні величини, що входять до визначальних рівнянь, – сили (напруження) і переміщення (деформації) – вимірюються і визначаються в процесі *макроексперименту*, тобто такого експерименту, результати якого використовуються для побудови та перевірки феноменологічних теорій механіки.

Тому, якщо йдеться про експериментальні методи в МДТТ, необхідно враховувати, що маються на увазі методи макроексперименту, що дозволяють встановлювати взаємозв'язок між зусиллями та деформаціями та досліджувати закономірності макродеформування та макроруйнування твердих тіл.

Очевидно, що дані макроексперименту достатні для обґрунтування феноменологічних теорій МДТТ, однак уточнення меж застосування цих теорій, а також рівнянь стану може бути виконано з використанням фізичного *мікроексперименту*, за допомогою якого досліджуються мікроскопічні явища в структурних елементах тіла. Дослідження внутрішніх процесів у структурі матеріалу є предметом фізики, а не механіки, але результати цих досліджень можуть допомогти у виборі найбільш адекватних механічних моделей. Отже, макроексперимент і фізичний мікроексперимент протиставляти не можна, вони доповнюють один одного і дозволяють всебічно обґрунтувати справедливість рівнянь стану та теорій МДТТ, що базуються на них. Проте в рамках механіки фізичні методи практично не використовуються, тому що вони не мають самостійного значення при формулюванні визначальних рівнянь, а їх застосування пов'язане з реалізацією специфічної техніки експерименту, що істотно відрізняється від техніки макроексперименту. Тому питання постановки фізичного експерименту нижче не розглядатимуться.

У всі часи розвиток механіки деформованого твердого тіла завжди стимулювався необхідністю вдосконалення методів розрахунку конструкцій на міцність. При цьому в рамках міцності з використанням підходів механіки повинні вирішуватись такі три основні задачі:

- розробка розрахункових та експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану елементів конструкцій;
- розробка критеріїв граничного стану та формулювання теорій міцності;
- обґрунтування методів вибору коефіцієнтів запасу міцності і значення допустимих напружень.

Вирішення цих завдань базується на макроексперименті, тому в даний час застосування експериментальних методів здебільшого пов'язане з проблемою міцності.

1.3 Історія розвитку експериментальних методів

Витоки вчення про міцність матеріалів і споруд, пов'язані із запитам практиці, йдуть у глибину століть. Їх умовно можна розділити на наступні значущі часові періоди, які пов'язані з діяльністю наступних особистостей.

Стародавній світ

Архіт Тарентський (430-365 р. д.н.е.) – математик, механік, полководець, автор 7-ми книг «Початків Евкліда», в якій описані різноманітні машини і механізми, що використовувалися у військовій техніці, винайшов літаючого голуба.

Архімед Сиракузький (287-212 р. д.н.е.) – родоначальник статички, гідростатички, винахідник гідропідйомного гвинта та різних механізмів.

Марк Вітрувій (I ст. д.н.е.) – автор 10 книжок з архітектури.

Їх розробки не можна назвати строго науковими, однак вони намагалися виробити такі світоглядні підходи до призначення оптимальних форм і розмірів елементів споруд, які б забезпечували їх достатню міцність і надійність при тривалій експлуатації. Прийоми розрахунку, що використовувалися стародавніми вченими ґрунтувалися лише на їх власному досвіді та вироблених уявленнях, вони не були підкріплені експериментом у його сучасному розумінні і тому не могли бути застосовані їх послідовниками і практично не вплинули на розробку та розвиток вчення про міцність матеріалів та споруд.

В XVII столітті експеримент, як вдосконалення розрахунків на міцність, пов'язаний з роботами наступних вчених:

Галілео Галілей (1564-1642 рр.) – виконав перші відомі дослідження на міцність і зробив висновок, що міцність бруса при розтязі прямо пропорційна його поперечному перерізу і не залежить від довжини бруса. Виконав у першій половині XVII століття експериментальне дослідження поведінки балок при згині. І хоча з сучасної точки зору на підставі цих дослідів сформульовані неправильні висновки, Галілея можна вважати **родоначальником макроексперименту** не тільки в міцності, але й в МДТТ в цілому.

Гук (1635-1703рр.) 1678 р. і **Маріот** (1620-1684рр.) в 1680 р. сформулювали перший і основний закон МДТТ, заснований на використанні дослідних даних - *закон лінійної пружності*.

Лейбніц (1646-1716рр.) у 1690 р. сформулював *закон нелінійної пружності*, заснований на експерименті, і описав гіперболою отримані у 1687 р. Я.Бернуллі дослідження. При цьому він відзначив, що ці дослідження відрізняються від дослідів Гука та Маріотта.

Я.Бернуллі (1654-1705рр.) у 1695 р. результати своїх дослідів описав параболою:

$$\Delta l = kP^m, \quad (1.1)$$

де Δl – видовження, P – поздовжнє зусилля, та k і m – постійні.

Бюльфіnger, якому пізніші автори приписують параболічний закон Я.Бернуллі, в 1729 р. запропонував в залежності (1.1) приймати значення показника ступеня $m = 3/2$.

XVIII століття можна вважати століттям початку інтенсивного використання результатів дослідів для побудови та конкретизації теорій МДТТ та пов'язане з діяльністю таких видатних вчених:

Л.Ейлер (1707-1783рр.) та Д.Бернуллі (1700-1782рр.) внесли істотний внесок у створення теорій згину та коливань пружних стрижнів; Ейлером виконані перші дослідження пружної стійкості поздовжньо стиснутих стрижнів.

Якщо XVII століття для МДТТ було століттям формулювання законів лінійної та нелінійної пружності, то лише у XVIII та XIX століттях було введено поняття про характеристики пружності, використання яких дозволило конкретизувати основні розрахункові співвідношення теорій пружності, наприклад:

Кулон (1736-1806 рр.) лише в 1780 р. за результатами випробувань на кручення дроту ввів поняття «модуля пружності», який згодом почали називати модулем зсуву або модулем пружності II-го роду та позначати як G .

Хладні (1756-1827 рр.) у 1787 р. розробив і реалізував експериментальний (динамічний) метод визначення модуля зсуву при крутильних коливаннях (зазначимо, що динамічний метод і в даний час є основним для модулів пружності в умовах резонансних поздовжніх, крутильних і поперечних коливань).

Юнг (1773-1829) р. англійський вчений - популяризатор науки (за освітою лікар) у 1807 у своєму «Курсі лекцій з натуральної філософії та мистецтва механіки» пропонує аналогічно модулю пружності за кручення, обґрунтованому Кулоном, ввести поняття про модуль пружності за розтягу - модуль пружності I-го роду (модуль нормальної пружності), що позначається в даний час як E і названий модулем Юнга. Потрібно відзначити, що вводячи поняття про модуль пружності за розтягу, Юнг посилався на роботи Ейлера, Кулона і Хладні.

Однак в 1849 р. в Британії Королівська комісія при перевірці справедливості з-ну Гука хибно визначила, що для більшості матеріалів закон Гука не справедливий і його використання є «шкідливим».

У XIX столітті експериментальне дослідження міцності матеріалів проводилося широким фронтом. Були встановлені основні закономірності в

поведінці матеріалів при різних режимах навантаження та відкрито ряд явищ, які послужили основою для формування самостійних напрямків в експериментальному дослідженні міцності та розробці методів розрахунку на міцність елементів конструкцій, а саме:

Коріоліс (1792-1843 рр.) у 1830 р. та **Віка** (1786-1861 рр.) у 1834 р. незалежно відкрили явище повзучості;

Вебер Вільгельм у 1835 р. відкрив явище пружної післядії;

Савар у 1837 р. відкрив, а **Массон** у 1840 р. досліджував явище переривчастої плинності (згодом назване ефектом Портевена-Ле Шательє);

Кальрауш у 1863 р. відкрив та досліджував явище релаксації напружень;

Альберт у 1829 провів перші випробування міцності металевих сплавів при циклічному навантаженні;

Рейкайн в 1843 р. описав поломки осей залізничних вагонів від явища втоми;

Веллер в 1853 отримав першу експериментальну криву втоми.

Перші експериментальні дослідження при пружнопластичному циклічному деформуванні матеріалів пов'язані з ім'ям **Баушингера**, який у 1879-1883 рр. опублікував роботи, де описані особливості поведінки металів при повторно-статичному знакоперемінному навантаженні.

Луї Марі Анрі Нав'є (1785-1836 рр.) у 1826 р. видав перший підручник з опору матеріалів, у якому знайшла відображення розроблена ним теорія розрахунку балок на згин з урахуванням дії лише нормальних напружень, заснована на використанні розрахункового співвідношення, відомого в наш час як рівняння Нав'є.

Дмитром Івановичем Журавським у працях (1821-1891 рр.) у 1856 р. була розроблена Технічна теорія згину балок з урахуванням дії не тільки нормальних, а й дотичних напружень. Д.І.Журавський – наш земляк родом із Чернігівської губернії – закінчив фізико-математичний лицей у м. Ніжині та Петербурзький інститут шляхів сполучення, після чого як молодий фахівець працював на будівництві залізниці Москва-Петербург. Там при будівництві невеликих мостів він зрозумів і обґрунтував необхідність врахування дотичних напружень при розрахунках на згин, показавши що для коротких балок їх неврахування призводить до великих похибок в оцінці граничного стану. Ця теорія розрахунку виходить з використання формули, добре відомої у наш час як формула Журавського.

Необхідно згадати і одного з найвидатніших експериментаторів ХІХ століття **Гійоме Вертгейма** (1815-1861). Його батько був віденським банкіром з великим статком, він помер незадовго до народження Вертгейма,

а мати померла відразу після пологів. Г.Вертгейм ріс сиротою, отримав у Відні медичну освіту, залишивши медицину в 1839 протягом двох років вивчав математику і фізику в Берлінському університеті. У 1841 р. Г.Вертгейм вирушив до Франції і там протягом двадцяти років займався експериментальними дослідженнями у сфері механіки твердого тіла. Все, що залишилося йому у спадок від батька він використав для створення експериментальної бази для досліджень, придбання матеріалів та виготовлення зразків.

Г.Вертгейм провів всебічне дослідження характеристик пружності металевих матеріалів за статичного та динамічного навантажень в умовах розтягу, кручення та згину, випробувавши 15 металів та 40 сплавів; вивчив вплив на ці характеристики температури, магнітних полів, електричного струму та попередньої пластичної деформації тощо.

Він сформулював один з основних законів фотопружності - лінійний закон зв'язку оптичних характеристик прозорих матеріалів з різницею головних напружень, який називається законом Вертгейма і на якому базується використання поляризаційно-оптичних методів для вивчення напружено-деформованого стану складних елементів конструкцій.

Г.Вертгейм є одним із перших дослідників у біомеханіці: він вивчив пружність кісток, тканин, м'язів, артерій та нервів людського тіла залежно від статі, віку тощо.

Трагедія Г.Вертгейма, як пише відомий історик науки Джеймс Белл, полягала в тому, що в середині XIX століття він ставив коректні експериментальні задачі у контексті невірних теорій. Так, він показав, що атомістичні теорії пружності Пуассона та Коші не підтверджуються експериментально навіть для ізотропних пружних тіл. Через це, не витримавши цькування, в 1861 р. він наклав на себе руки, кинувшись з вежі в місті Тур.

Важливо відзначити, що суттєвого розвитку отримали у першій половині XIX століття технічні засоби для проведення експерименту та методи вимірювань:

Віка в 1831 р. досяг дуже високої точності при вимірюванні деформації, що досягла 10^{-7} мм/мм;

Пуйе в 1844 р. при дослідженні хвиль в умовах ударного навантаження вимірював процеси тривалістю 10 мкс (0,01 мс).

Наприкінці XIX – на початку XX ст. інтенсивний розвиток отримали роботи в галузі пластичності, повзучості та тривалої міцності, основою яких стали дані макроексперименту. Друга половина XX ст. характеризується розвитком досліджень в області механіки руйнування (**Грифітс, Ірвінг, Райс, Черепанов**) та малоциклової втоми (**Коффі́н, Менсон**), вдосконаленням апаратури та обладнання для проведення експерименту та розширенням можли-

востей експериментальних засобів у зв'язку з істотним посиленням вимог до формування умов випробувань за температурними, швидкісними, частотними та іншими параметрами. Сучасні комплекси для проведення експериментальних досліджень міцності та деформованості матеріалів та конструкцій представляють собою складні багатоцільові системи, оснащені електрогідромеханічними виконавчими органами, електронною вимірювальною, керуючою апаратурою та електронними обчислювальними машинами для обробки результатів випробувань та оперативного управління ходом експерименту в реальному часі.

1.4 Класифікація експериментальних методів

Класифікувати експериментальні методи та відповідне обладнання для випробувань можна за різними ознаками в залежності від спрямованості досліджень, тому в певному сенсі така класифікація є умовною. В даний час застосування експериментальних методів пов'язане з дослідженням закономірностей деформування та руйнування матеріалів та елементів конструкцій у різних умовах: в умовах простого та складного напружених станів; за статичного, динамічного та циклічного навантаження; за низьких і високих температурах; в умовах впливу на матеріали різних активних середовищ та в умовах вакууму; з урахуванням впливу силових, теплових та електромагнітних навантажень. Метою таких досліджень може бути перевірка справедливості гіпотез та теорій МДТТ, отримання даних про механічну поведінку матеріалів при зовнішньому навантаженні, визначення їх механічних характеристик або оцінка несівної здатності елементів конструкцій тощо.

1.4.1 За цільовими ознаками

Якщо в основу класифікації покласти цільові ознаки, то експериментальні методи можна умовно поділити на такі групи:

1.1 – методи перевірки справедливості гіпотез, теорій МДТТ та визначальних рівнянь у різних умовах;

1.2 – методи визначення механічних характеристик матеріалів;

1.3 – методи дослідження напружено-деформованого стану конструкцій;

1.4 - методи контролю пошкодженості матеріалу в конструкції та оцінки міцності конструктивних елементів за граничним станом (використання цих методів пов'язане з розробкою розрахункових схем для прогнозування залишкової довговічності);

1.5 – методи натурних випробувань елементів конструкцій та готових виробів у реальних умовах для визначення їхньої несівної здатності та ресурсу.

1.4.2 За видом напруженого стану

Якщо в основу класифікації покласти вид напруженого стану, то експериментальні методи можна поділити на такі групи:

2.1 – методи дослідження закономірностей деформування та руйнування матеріалів в умовах лінійного напруженого стану (ці методи поєднують дослідження на зразках при розтязі, стисканні або чистому згині);

2.2 – методи дослідження закономірностей деформування матеріалів та елементів конструкцій в умовах двовісного (плоского) напруженого стану (ця група поєднує дослідження на тонколистових плоских, трубчастих або сферичних тонкостінних зразках та елементах конструкцій за однорідного напруженого стану та циліндричних суцільних зразках за неоднорідного);

2.3 – методи дослідження закономірностей деформування та руйнування в умовах тривісного (об'ємного) напруженого стану (ці методи найменш розвинені у зв'язку з труднощами методичного характеру).

1.4.3 За характером впливу зовнішнього навантаження

Якщо за основу класифікації покласти характер впливу зовнішнього навантаження, то експериментальні методи можна умовно розділити такі групи:

3.1 – методи дослідження за статичного навантаження, швидкості деформування для цієї групи методів змінюються практично в інтервалі від 10^{-8} до 5 мм/с, що забезпечує проведення випробувань на повзучість, а також короткочасну та тривалу міцність;

3.2 – методи дослідження за динамічного навантаження, швидкості деформування за такого навантаження змінюються в інтервалі від 5 мм/с до 1000 м/с і більше за дії ударних та імпульсних навантажень;

3.3 – методи дослідження за повторно-змінного (циклічного) навантаження, частоти навантаження, що реалізуються в цьому випадку, відповідають інтервалу від $3 \cdot 10^{-4}$ Гц до 100 кГц; методи цієї групи у свою чергу можуть бути розділені за частотою на такі підгрупи:

3.3.1 – методи дослідження малоциклової втоми: частотний діапазон $3 \cdot 10^{-4}$ – 5 Гц;

3.3.2 – методи дослідження багатоциклової (класичної) втоми: частотний діапазон 5-500 Гц;

3.3.3 – методи дослідження високочастотної втоми: частотний діапазон 0,5 – 100 кГц.

Необхідно відзначити, що межа між малоцикловою, багатоцикловою і високочастотною втомою є розмитою за частотою, і вище як граничні наведені певною мірою умовні значення частот. Так, залежно від матеріалу, асиметрії циклу та умов випробувань при частоті 5 Гц можна отримати як малоциклове, так і звичайне втомне руйнування.

Більш строго частотний інтервал безвідносно до характеру втомного руйнування, може бути розбитий на інфразвуковий, звуковий та ультразвуковий. Частота 16-30 Гц відповідає межі між інфразвуковим та звуковим інтервалами, а 16-18 кГц – між звуковим та ультразвуковим. При цьому ультразвуковими називаються частоти понад 18 кГц, а втома, що спостерігається за таких частот, називається ультразвуковою.

За довговічністю межа між областями малоциклової та багатоциклової втоми відповідно до ГОСТ 23026-78 встановлюється при числі циклів до руйнування, що дорівнює $5 \cdot 10^4$, що теж дуже умовно. Зазначимо, що такої, навіть умовної, межі між багатоцикловою та високочастотною втомою немає [10, 11].

1.4.4 За температурою випробувань

Якщо за основу класифікації покласти температуру випробувань, то експериментальні методи можна розділити такі групи [2, 34, 35]:

4.1 – методи випробувань за кімнатних температур: 293 ± 10 К;

4.2 – методи високотемпературних випробувань:

а) за підвищених температур: 303 -1273 К;

б) за високих температур: вище 1273 К.

4.3 – методи низькотемпературних випробувань:

а) за знижених температур: 120-283 К;

б) за криогенних температур 0 – 120 К.

1.4.5 За природою навантажень

Якщо в основу класифікації покласти природу навантажень, що впливає на матеріал, то експериментальні методи можна розділити на наступні три групи:

5.1 – методи досліджень за силового впливу від зовнішніх навантажень (до цієї групи належать методи, реалізація яких пов'язана з впливом

зовнішніх зосереджених та розподілених навантажень, а також відцентрових, інерційних сил та сил тяжіння);

5.2 – методи досліджень за впливу на матеріали та елементи конструкцій теплових потоків та неоднорідних температурних полів (до цієї групи належать методи дослідження на термоудар, термостійкість і термовтому, при реалізації яких напруження в матеріалі виникають завдяки наявності градієнтів температури);

5.3 – методи досліджень за впливу на матеріали та елементи конструкцій потужних магнітних полів (постійних та імпульсних) та імпульсів струму великої сили (ці методи набули розвитку лише останнім часом у зв'язку з використанням у техніці явища надпровідності, що проявляється при близьких до абсолютного нуля температурах, а також завдяки використанню електроімпульсної обробки металів у технологічних операціях).

Таким чином, вище розглянуто класифікацію методів експериментальних досліджень за п'ятьма можливими ознаками. Очевидно, що відповідно до запропонованої класифікації можна провести чітку грань між різними методами. Так, якщо трубчастий зразок з тугоплавкого сплаву випробовувати в умовах плоского напруженого стану за високої температури для перевірки, наприклад, теорій пластичності, то реалізовані в цьому випадку експериментальні методи відповідно до розглянутої класифікації можна позначити як: 1.1, 2.2, 3.1, 4.2.б, 5.1.

Лекція 1. Основні поняття, макроексперимент в механіці деформівного твердого тіла, класифікація експериментальних методів

Контрольні запитання за розділом 1

1. Дати визначення експерименту, макро- та мікроексперименту?
2. Що таке феноменологічна теорія?
3. Дати визначення механіки деформованого твердого тіла (МДТТ).
4. Які складові МДТТ: теорії МДТТ; задачі МДТТ?
5. Які ознаки використовуються для класифікації експериментальних методів?
6. Класифікація за цільовими ознаками.
7. Класифікація за видом напруженого стану.
8. Класифікація за характером навантаження.
9. Класифікація за температурою.
10. Класифікація за природою діючих навантажень.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Планування експерименту

З постановкою і проведенням експериментів фактично пов'язана історія людства в цілому. Проте в більшості випадків ці роботи проводились хаотично на рівні інтуїції і попереднього досвіду, тому коефіцієнт корисної дії їх був досить низьким. Коли враховувати, що вартість одного досліду, як правило, висока, то не важко уявити, скільки коштувало людству проведення науково не спланованих експериментів.

Важливою умовою науково поставленого досліду є мінімізація загального числа дослідів (а отже, затрат матеріальних, трудових і часових), при цьому зменшення кількості дослідів не повинно суттєво позначитись на якості одержаної інформації.

При плануванні експерименту необхідно перш за все визначити мету експерименту і показники його якості, вказати характеристики плану і побудувати модель експерименту, вибрати критерії оптимальності плану і встановити обмеження на показники якості дослідження. Організація і проведення експериментального дослідження потребує застосування особливих методів планування експерименту, тобто процедури вибору числа дослідів, необхідних і доступних для вирішення завдання з необхідною точністю і статистичною надійністю, умов постановки дослідів, методів математичної обробки результатів і методів теорії прийняття рішень.

Після того як вибрана модель об'єкта і сформульована мета дослідження, треба спланувати експеримент, тобто: вибрати методи вимірювань і можливі типи засобів вимірювань; дати апріорну оцінку похибок вимірювань; сформулювати вимоги до метрологічних характеристик засобів і умов вимірювань; вибрати засоби вимірювань відповідно до заданих вимог; вибрати параметри вимірювальної процедури; підготувати засоби вимірювання для проведення експерименту та забезпечити умови проведення експерименту.

2.1.1 Основні етапи під час проведення експерименту

1. Складання плану експерименту;
2. Придбання обладнання та розробка (освоєння) методики випробувань;
3. Проведення випробувань;
4. Обробка та аналіз результатів випробувань;

5. Складання та написання узагальнюючого звіту.

Планування експерименту зводиться до визначення обсягу випробувань та визначення результатів, які потрібно отримати. Експеримент необхідно реалізувати таким чином, щоб за мінімальною кількістю дослідів, варіюючи значеннями незалежних змінних за спеціально сформульованим правилом, побудувати математичну модель і знайти значення факторів, що забезпечують отримання достовірних результатів.

При плануванні експерименту оперують такими величинами:

- фактор (незалежна змінна величина);
- результат (залежна змінна величина);
- зовнішня змінна (випадкова величина).

Фактором називається така незалежна змінна величина, значенням якої експериментатор може управляти у процесі експерименту.

Фактори, що впливають на характеристики міцності: температура, швидкість навантаження (деформування), режим навантаження, форма зразка, розмір зерна, хімічний склад, середовище, система силованаантаження і т.д.

Результат – це величина, яку отримуємо у процесі експерименту.

Зовнішньою змінною величиною називається така величина, яка змінюється випадковим чином, незалежно від бажання експериментатора і якою не можна керувати у процесі експерименту (температура оточуючого середовища, електромагнітний фон, вологість, вібрація тощо).

2.1.2 Основні принципи планування експерименту

Під час планування експерименту:

- необхідно досліджувати вплив на результат мінімальної кількості факторів;
- необхідно прагнути виключення впливу зовнішніх змінних на результат;
- необхідно використовувати прилади та обладнання одного класу точності.

При визначенні обсягу експерименту реалізуються такі етапи:

- визначення кількості досліджуваних факторів;
- визначення меж зміни факторів;
- визначення інтервалів та рівнів факторів.

2.1.3 Типи експериментів

Експерименти поділяються на **однофакторні та багатофакторні**.

За однофакторного експерименту досліджується вплив на результат одного фактора; при багатофакторному експерименті досліджується вплив на результат факторів більше одного.

Експерименти діляться також на **відтворювані і невідтворювані**.

Відтворюваний це такий експеримент, який можна повторити неодноразово на тому самому об'єкті дослідження. За невідтворюваного експерименту змінюються властивості об'єкта дослідження та його не можна повторювати на одному й тому самому об'єкті.

У механіці деформівного твердого тіла більшість експериментів невідтворювані, за винятком небагатьох.

Стосовно багатофакторного експерименту експерименти поділяються на **збалансовані та незбалансовані**.

Збалансований це такий багатофакторний експеримент, у процесі якого випробування проводяться для різних факторів на однаковій кількості рівнів (наприклад, випробування на міцність при 5 рівнях температур та 5 рівнях швидкостей навантаження).

За **незбалансованого** експерименту кількість рівнів для досліджуваних факторів відрізняється.

2.1.4 Плани експерименту

Для однофакторного експерименту існує два види планів: **послідовні та рандомізовані** (випадкові) плани.

Послідовні плани використовуються тільки для експерименту, що не відтворюється, а рандомізовані – для відтворюваного.

При здійсненні послідовного плану для невідтворюваного експерименту перехід від одного граничного значення фактора до іншого здійснюють регулярно (послідовно), дискретно, через певні інтервали зі спаданням (від max до min) або зі збільшенням (від min до max), рис. 2.1.

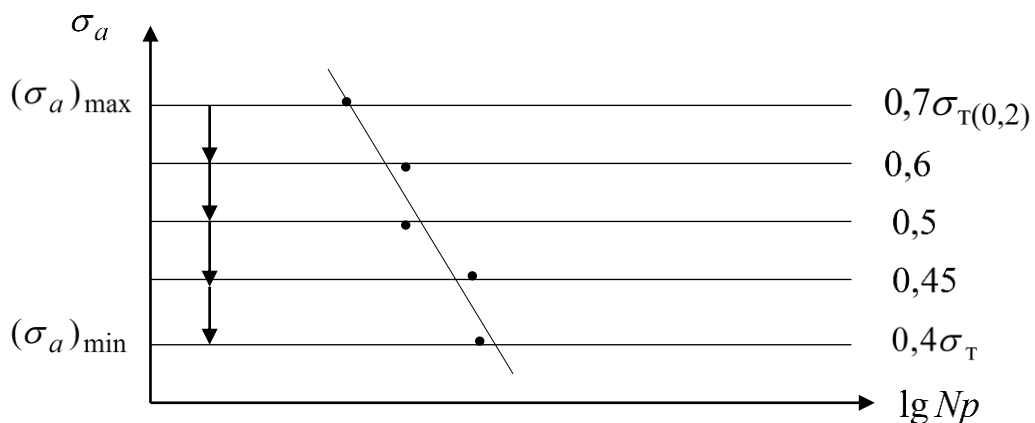


Рис. 2.1. Схема встановлення рівнів факторів за випробувань на втому

З використанням рандомізованого плану рівні чинників визначаються за допомогою таблиці випадкових чисел чи генеруються випадковим чином.

Плани при багатofакторному експерименті

При багатofакторному експерименті використовуються два типи планів: класичні та факторні.

Класичний план використовується для більш трудомісткого експерименту, він є набором послідовних планів для однофакторних експериментів. Якщо X, Y, Z – фактори, то при реалізації класичного плану приймають:

- 1) $X = \text{const}; Y = \text{const}; Z = \text{var};$
- 2) $X = \text{const}; Y = \text{var}; Z = \text{const};$
- 3) $X = \text{var}; Y = \text{const}; Z = \text{const}.$

На рис. 2.2 та рис. 2.3 наведено приклади класичних планів.

		Рівні змін. Y				
		1	2	3	4	5
Рівні змін. X	5			+		
	4			+		
	3	+	+	+	+	+
	2			+		
	1			+		

Рис. 2.2. Класичний план двофакторного неповного експерименту

Використання такого плану (рис. 2.2) обмежено залежностями:

$$\begin{cases} R = AX^m + BY^n; \\ R = AX^mY^n, \end{cases} \quad (2.1a)$$

де R – результат.

		Рівень змін. Y				
		1	2	3	4	5
Рівні змін. X	5	+	+	+	+	+
	4	+	+	+	+	+
	3	+	+	+	+	+
	2	+	+	+	+	+
	1	+	+	+	+	+

Рис. 2.3. Класичний план двофакторного повного експерименту

Класичний план (див. рис. 2.3) може використовуватися, якщо зв'язок між факторами та результатом описується складнішими залежностями:

$$\begin{aligned} R &= AX \sin \frac{BY}{X}, \\ R &= AX^{BY}. \end{aligned} \tag{2.16}$$

2.1.5 Факторні плани

Факторні плани дозволяють істотно зменшити обсяг експерименту. Вони використовуються для планування багатофакторного експерименту, коли кількість факторів перевищує 2, а кількість рівнів перевищує 3. При постановці експерименту з використанням факторних планів використовуються не всі комбінації факторів, а деякі. Але при використанні факторних планів для встановлення залежності між результатом та фактором використовується вся сукупність даних експерименту та результат визначається з максимальною точністю.

Слід зазначити, що на використання факторних планів встановлено суттєві обмеження, пов'язані з тим, що до проведення експерименту потрібно знати, які залежності описують зв'язок між фактором та результатом, і ці залежності мають бути строго визначеними та відповідати умовам (2.2) та (2.3):

$$R = f_1(x) + f_2(y) + f_3(z), \tag{2.2}$$

$$R = f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot f_3(z), \tag{2.3}$$

де R – результат.

При цьому співвідношення (2.3) може бути приведене до виду (2.4),

$$\log R = \log f_1(x) + \log f_2(y) + \log f_3(z), \tag{2.4}$$

тобто факторний план можна використовувати у тому випадку, якщо результат є сумою функцій незалежних змінних (факторів).

Функції f_1, f_2, f_3 можуть бути будь-якої складності, але не повинно бути їхнього взаємного впливу; ці функції повинні описувати явища, які не є взаємопов'язаними, і для таких функцій не має бути взаємного впливу факторів на результат. Необхідно відзначити, що відповідні явища зустрічаються дуже рідко, і як правило, в механіці деформівного твердого тіла проявляється синергетичний ефект – ефект посилення впливу факторів. Факторні плани можуть використовуватися лише у тому випадку, коли синергетичний ефект відсутній.

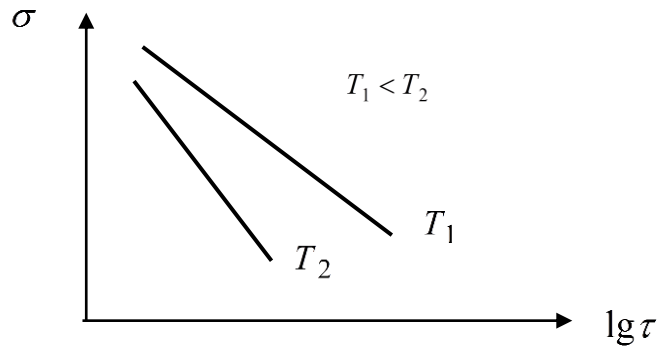


Рис. 2.4 Криві тривалої міцності

На рис.2.4 показані результати випробувань на тривалу міцність для двофакторного експерименту, коли спостерігається взаємний вплив на довговічність напружень (σ) та температури (T).

В цьому випадку використання факторного плану неприпустимо, так як спостерігається реалізація синергетичного ефекту (крутість нахилу кривої тривалої міцності збільшується з підвищенням температури).

На рис. 2.5а показаний факторний план багатofакторного експерименту «латинський квадрат», а на рис. 2.5б класичний план такого ж експерименту («латинський квадрат» - це факторний план 3-х факторного збалансованого експерименту на 5-ти рівнях). Як видно, з використанням «латинського квадрата» потрібно провести лише 25 дослідів для отримання результату, а для класичного плану їхня кількість досягає 125.

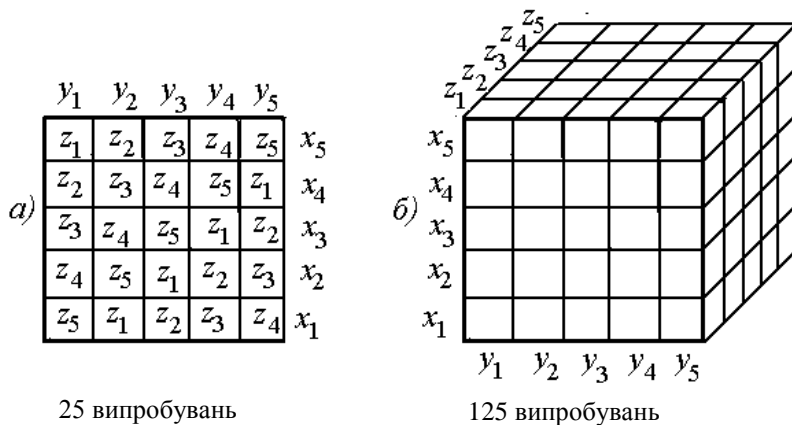


Рис. 2.5 Збалансовані факторний (а) та класичний (б) плани для однакової кількості факторів (трьох) та рівнів факторів (п'яти)

Кількість випробувань за класичним планом визначається $N = k^n$ де k – кількість рівнів, n – кількість факторів

Докладно основи планування експерименту викладені в [60].

2.2 Випробувальні системи із замкнутим контуром регулювання

Сучасні експериментальні комплекси мають забезпечувати:

- створення та прикладення до об'єкта дослідження зовнішнього навантаження у заданому режимі та за заданим законом;
- створення в зоні об'єкта дослідження необхідних температурних умов та середовища;
- вимірювання величин, що входять до визначальних рівнянь механіки деформованого твердого тіла (деформацій, напружень тощо);
- обробку результатів експерименту в реальному часі та вироблення команд управління, якщо умови експерименту порушені;
- подання експериментальних даних у необхідному вигляді (з використанням індикаторів та електронних носіїв) для оцінки результату в процесі експерименту або після його закінчення.

Універсальна блок-схема системи із замкнутим контуром регулювання наведена на рис.2.6.

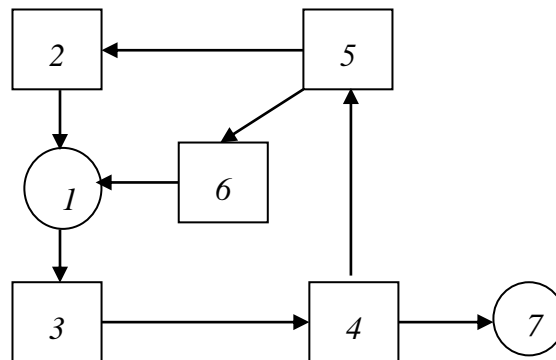


Рис. 2.6. Блок-схема системи із замкнутим контуром регулювання: 1 – об'єкт дослідження, 2 – блок навантаження – виконавчий орган – система силованаантаження, 3 – система вимірювання, 4 – блок обробки результатів, 5 – блок вироблення команд управління, 6 – система створення середовища та температур, 7 – блок подання результатів (індикації)

До об'єктів дослідження (ОД) – 1 належать зразки, моделі, натурні елементи конструкцій. Призначення блоку 2 – перетворення електроенергії, що отримується від мережі, у роботу, витрачену на деформування та руйнування ОД. В якості перетворювачів використовуються: електромеханічні, інерційні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні, електродинамічні, магнітострикційні, п'єзоелектричні. Система 3 призначена для вимірювання величин, що входять у визначальні рівняння, та температури. Щоб виміряти деформації (ε) та напруження (σ), потрібно їх змінювати на електричні

сигнали; у цьому випадку на виході системи виміру отримуємо зміну у аналоговій формі. Аналоговий сигнал характеризується амплітудою та періодом; на виході 3 потрібно отримувати як аналоговий, так і цифровий (амплітуда) сигнали. 4 – блок обробки результатів вимірювань – це ЕОМ (ПК). 5 – блок вироблення команд управління, який порівнює заданий параметр із відпрацьованим та виробляє команди управління (зворотній зв'язок). Блок 5 представляє собою набір електронних пристроїв, які з частотою до 100 кГц виробляють електричні сигнали будь-якої форми та подають їх у систему силованавантаження, порівнюють відпрацьований сигнал із заданим і виробляють керуючі команди. 6 – система створення необхідних температурних умов та середовища в зоні ОД, 7 – система індикації. До системи індикації відносяться периферійні пристрої такі як: графопобудовувачі, мнемосхеми, магнітні носії, аналогово-цифрові друкувальні пристрої, монітори тощо.

В даний час найбільш відомі фірми випускають випробувальні машини, які побудовані за розглянутою схемою вимірювання, управління та індикації це фірми: MTS /USA/, Instron /GB/, Шенк та Цвік /Німеччина/, Інова /Чехія/ та Шімадзу /Японія/.

2.3 Об'єкти дослідження

Зразки. Зразком називається частина заготовки, яка в необробленому або певним чином обробленому стані піддається випробуванню [6].

Нижче розглянуто сучасні вимоги до обробки та виготовлення зразків:

1. Зразки для однієї серії випробувань повинні бути виготовлені з одного виробу або матеріалу однієї партії поставки, за єдиною технологією та на тому самому обладнанні, протягом однієї зміни одним і тим же робітником.

2. При виготовленні зразків не повинні змінюватися властивості матеріалу внаслідок термовпливу або наклепу.

3. Місця вирізки заготовок для зразків, їх кількість, розташування осі зразків по відношенню до заготовки повинні бути зазначені у технічних умовах на металопродукцію.

4. Вирізку заготовок проводять на металорізальних верстатах, ножицях, штампах, за допомогою анодно-механічного та кисневого різання. При цьому необхідно передбачити припуск на зону металу із зміненими властивостями, що видаляється при виготовленні зразків. За плазмового та лазерного різання обробка не проводиться.

5. Зразки виробляють з використанням металорізальних верстатів, глибина шару, що видаляється на останньому проході, не повинна перевищувати 0,3 мм.

6. Допускається проводити випробування литих зразків, зразків у вигляді сортового прокату та натурних деталей лише в тому випадку, якщо це обумовлено технічними умовами на металопродукцію.

7. При виготовленні зразків з листового прокату не допускається видалення поверхневих шарів прокату для запобігання видалення зміцненого поверхневого шару;

8. Не допускається випробовувати зразки з видимими ушкодженнями та дефектами (тріщинами, раковинами, розшаруваннями, вибоїнами).

2.3.1 Випробування на розтяг

Це випробування на короточасну міцність, у процесі яких визначаються характеристики міцності та пластичності, що є стандартними табличними характеристиками матеріалу [6, 7, 20]. У розрахунках на міцність зазвичай використовуються наступні механічні характеристики: границя міцності σ_s та границя плинності $\sigma_{0,2}(\sigma_T)$. При випробуваннях на розтяг записуються діаграми деформування в координатах «навантаження P – подовження Δl », які називаються первинними. Ці діаграми перебудовують у діаграми в координатах «напруження σ - деформація ε », які називаються вторинними, рис 2.7.

Первинна машинна діаграма (рис. 2.7а): I – ділянка пружного деформування; II – ділянка пружно-пластичного деформування зі зміцненням; III – ділянка пластичного деформування з локалізацією деформації у шийці.

Повні рівноважні діаграми – це діаграми з руйнуванням при нульовому навантаженні, див. рис. 2.7б.

Стандарти на випробування різних країн мають бути гармонізовані (узгоджені). Проведення випробувань повинно виконуватись відповідно до гармонізованих стандартів; в Україні порядок проведення випробувань на розтяг регламентовано стандартами ГОСТ 1497-84 та ДСТУ 7305:2013 [6, 20].

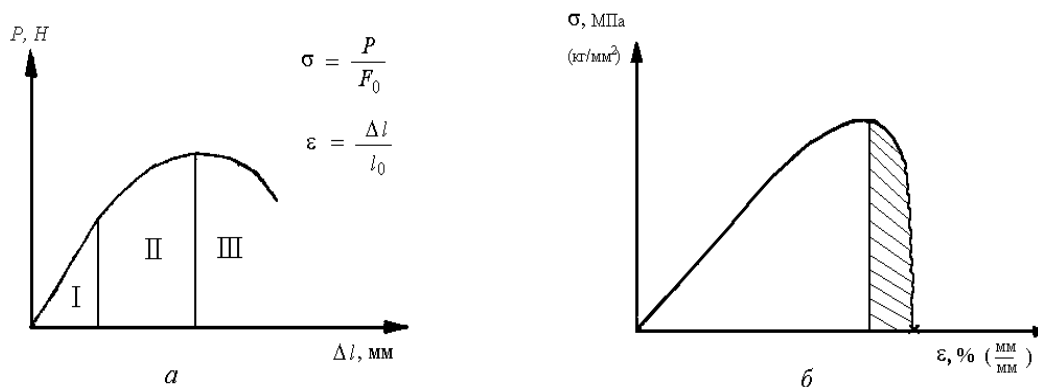


Рис. 2.7 Крива розтягу або діаграма деформування
(а – первинна машинна діаграма, б – вторинна діаграма)

2.3.2 Зразки для випробування на розтяг

Для випробувань на розтяг використовуються два типи зразків: зразки з циліндричною робочою частиною та листові зразки з плоскою робочою ділянкою, рис. 2.8

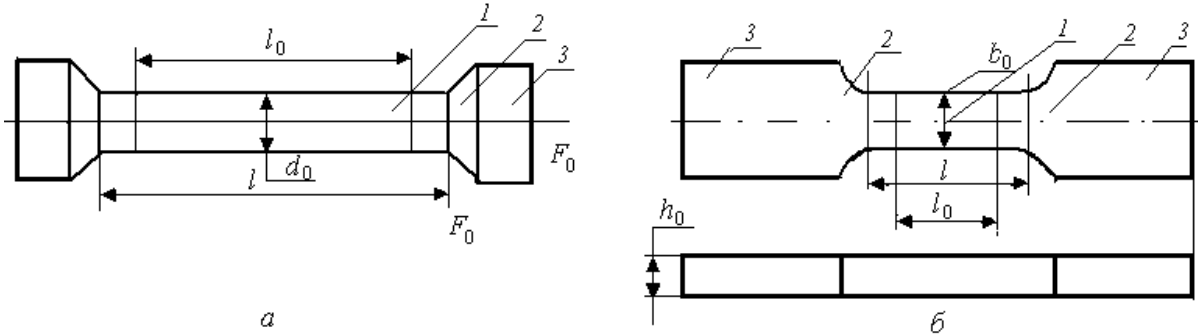


Рис. 2.8 Циліндричний (а) та плоский (б) зразки: 1 – робоча ділянка, 2 – перехідна ділянка, 3 – головка зразка; l - довжина робочої ділянки, l_0 - початкова розрахункова довжина, яка відповідає базі вимірювань, (тобто відстані між опорами тензметра, що вимірює деформації), h_0 і b_0 – початкова товщина та ширина робочої ділянки листового зразка

За стандартних умов мінімальний діаметр циліндричних зразків становить 3 мм, а рекомендований діаметр приймається рівним 10 мм. Мінімальна товщина листових зразків – 0,5 мм.

Стандартами рекомендовано використовувати пропорційні зразки:

- довгий зразок $l_0 = 10d_0 \rightarrow l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$

- короткий зразок $l_0 = 5d_0 \rightarrow l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$,

де F_0 - площа поперечного перерізу на робочій ділянці у вихідному стані. Для малопластичних матеріалів допускається випробовувати непропорційні зразки із співвідношенням розмірів $l_0 = 2,5d_0 \rightarrow l_0 = 2,82\sqrt{F_0}$. Для визначення довжини робочої ділянки приймаються такі співвідношення:

$$l = l_0 + (0,5 \dots 2,0)d_0 \quad \text{— для циліндричних зразків}$$

$$\left. \begin{cases} l = l_0 + (1,5 \dots 2,5)\sqrt{F_0}, & h_0 > 4 \text{ мм} \\ l = l_0 + \frac{b_0}{2}, & h_0 < 4 \text{ мм} \end{cases} \right\} \text{— для плоских зразків}$$

При $h_0 > 4$ мм необхідно приймати $\frac{b_0}{h_0} < 4$.

Форма та розміри головок зразків відповідно до чинних стандартів не є обов'язковими, у стандартах вони не обумовлюються; вони визначаються властивостями матеріалу та способом кріплення зразка у захватах випробувальної машини.

Спосіб кріплення зразка повинен бути таким, щоб:

- виключити прослизання зразка у захватах;
- виключити зминання опорних поверхонь;
- запобігти деформуванню та руйнуванню матеріалу в голівках та на перехідних ділянках;
- забезпечити жорстке центрування зразка в захватах для запобігання позацентровому розтягу.

Рекомендовані форми головок зразків наведено на рис. 2.9.

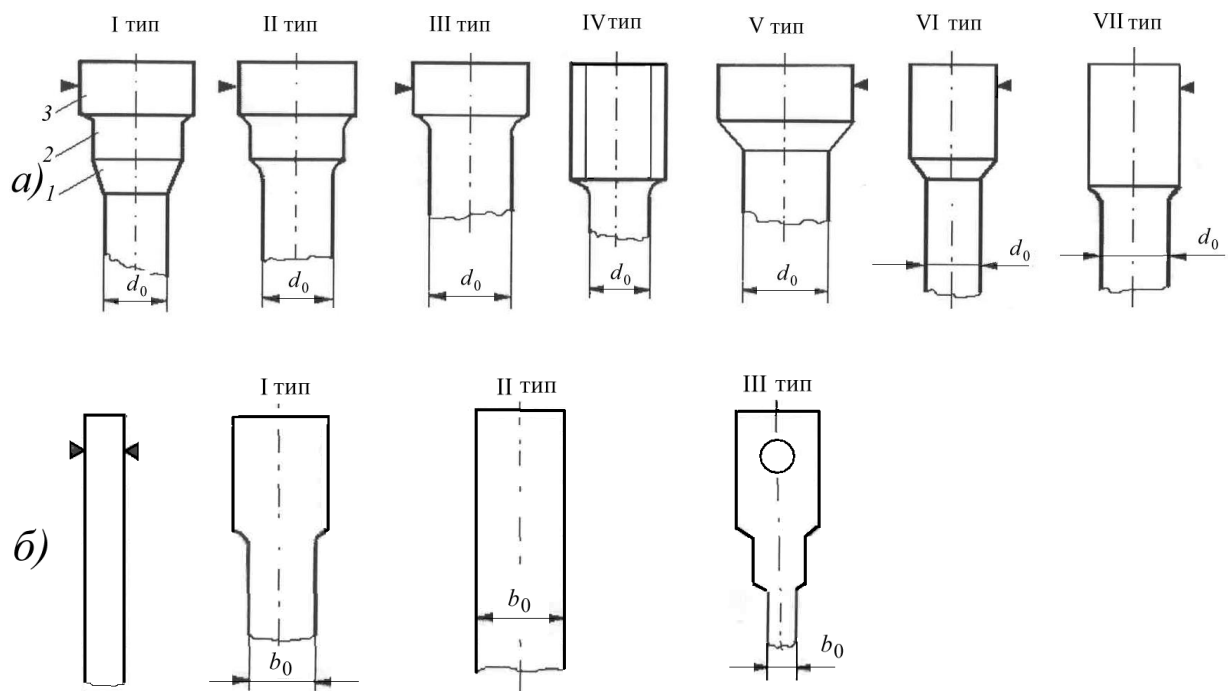


Рис.2.9 Форми головок зразків циліндричних

а) (I тип – універсальні, II та III типи – для гідрозахватів, IV тип – для різьбових захватів, V тип – для гідрозахватів, VI та VII типи – для прутка під цанговий захват) та плоских б) (I тип – універсальні, II тип – для зварних швів, III тип – для випробувань за високих температур); позначкою ▼ відмічені посадкові поверхні

2.4 Методи визначення характеристик міцності, пластичності і пружності за розтягу, стиску, зсуву і крученні, згину, повзучості, втоми, складного напруженого стану

2.4.1 Механічні характеристики міцності, які визначаються за випробування на розтяг, і методи їх визначення

Характеристики міцності

При випробуваннях на розтяг відповідно до вимог стандартів визначають наступні характеристики міцності та характеристики пластичності, позначення та методи визначення яких розглянуті нижче.

$\sigma_{mц}$ (МПа, кг/мм²) – границя пропорційності – напруження, за якого відхилення від лінійної залежності між навантаженням та деформацією досягає такої величини, що тангенс кута нахилу, утвореного дотичною до діаграми деформування в точці $P = P_{mц}$ з віссю ординат, збільшується на 50 % порівняно з пружною ділянкою, рис. 2.10 де $P_{mц}$ – навантаження, що відповідає границі пропорційності;

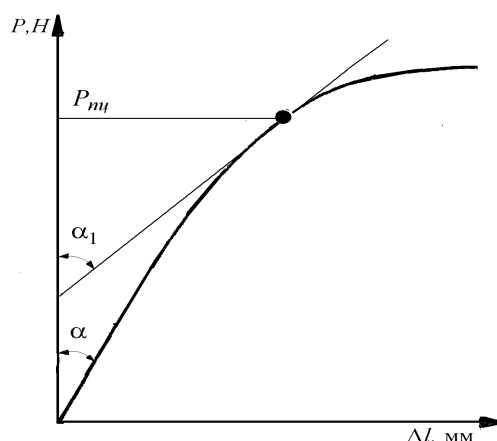


Рис. 2.10. Схема визначення навантаження, що відповідає границі пропорційності ($tg \alpha_1 = tg \alpha + 0,5 tg \alpha$)

$\sigma_{0,05}$ (МПа, кг/мм²) – границя пружності – напруження, за якого залишкова деформація досягає 0,05% довжини зразка на базі вимірювання (допускається 0,001 % – $\sigma_{0,001}$);

σ_T границя плинності фізична – мінімальне напруження, за досягнення якого деформування матеріалу (пластичне) відбувається при постійному навантаженні, рис. 2.11;

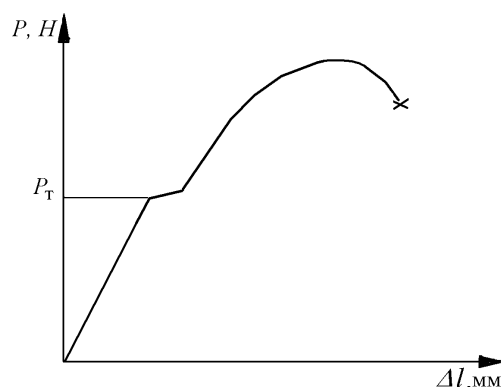


Рис. 2.11. Діаграма деформування металу з ділянкою плинності

$\sigma_{0,2}$ - границя плинності умовна – напруження, за якого залишкова деформація досягає 0,2% довжини зразка на базі вимірювання (допускається $\sigma_{0,5}$; $\sigma_{1,0}$ – було прийнято в країнах східної Європи для пластичних матеріалів);

σ_e - границя міцності (тимчасовий опір) - це напруження, яке відповідає максимальному навантаженню, що витримується зразком до руйнування;

S_k - істинний опір розриву – це напруження, яке відповідає навантаженню під час поділу зразка на дві частини.

Характеристики пластичності

δ - (% , мм/мм) – відносне подовження після розриву;

ψ - (% , мм/мм) – відносне звуження після розриву.

Для визначення розглянутих механічних характеристик використовуються такі співвідношення:

$$\sigma_{nc} = \frac{P_{nc}}{F_0}, \quad \sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}, \quad \sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad \sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad \sigma_e = \frac{P_{max}}{F_0}, \quad S_k = \frac{P_k}{F_k},$$

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l_k}{l_0} \cdot 100\%, \quad \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

де P , F_k , l_k – відповідно зусилля, площа поперечного перерізу в зоні руйнування та довжина робочої ділянки після руйнування.

Машинна діаграма деформування з позначенням навантажень, що відповідають механічним характеристикам, наведена на рис. 2.12, а на рис. 2.13 показано розташування цих характеристик на вторинній діаграмі.

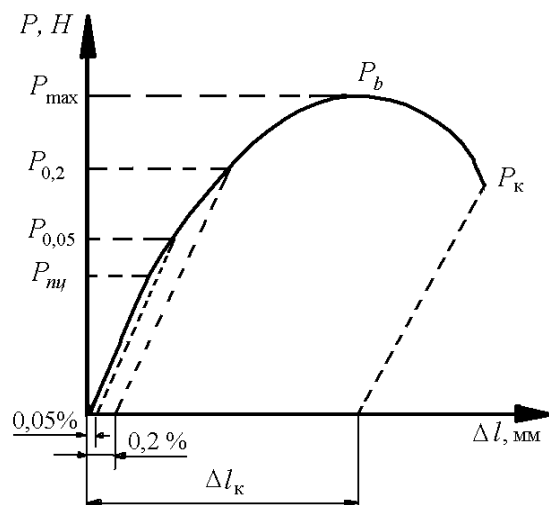


Рис. 2.12 Машинна (первинна) діаграма деформування (всі характеристики, крім ψ , визначаються з діаграми)

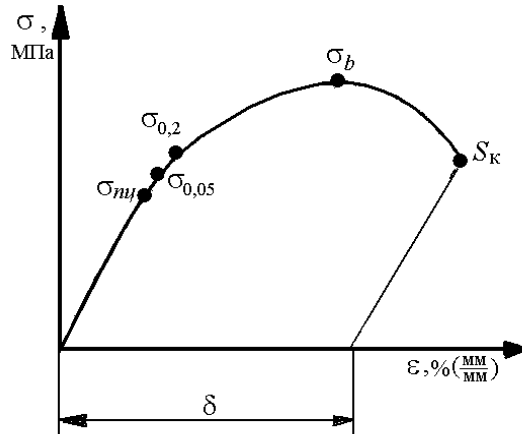


Рис. 2.13 Вторинна діаграма - номінальні напруження та деформації ($\sigma = \frac{P}{F_0}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$)

Якщо представляти вторинну діаграму в істинних координатах «істинне напруження – істинна деформація», то її вигляд суттєво змінюється, рис. 2.14.

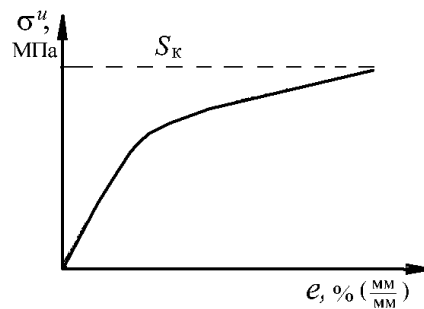


Рис. 2.14 Діаграма у істинних напруженнях та деформаціях (e - істинна деформація)

Істинна деформація визначається як

$$e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_i) \quad (2.5)$$

де ε_i – поточна деформація у фіксований момент часу, а $l = l_0 + \Delta l$.

Формула (2.5) справедлива на ділянці до σ_e (до появи шийки); для зони шийки отримаємо:

$$e = - \int_{F_0}^{F_k} \frac{dF}{F} = \ln \frac{F_0}{F_k} = \ln \frac{F_0}{F_0 - \Delta F} = \ln \left(\frac{1}{1 - \psi_i} \right) \quad (2.6)$$

де ψ_i – поточне звуження, а $F_k = F_0 - \Delta F$.

З умови нестискання можна записати $F_0 l_0 = F l$ ($\mu = 0,5$), де μ – коефіцієнт Пуассона; для металів $\mu = 0,22 \dots 0,35$.

Отримаємо

$$\frac{F_0}{F} = \frac{l}{l_0} \quad (2.7)$$

З урахуванням співвідношень (2.5) і (2.6) запишемо:

$$e = \ln(1 + \varepsilon_i) = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi_i}\right); \quad e = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi_i}\right) \quad (2.8)$$

В цьому випадку $\sigma^i = \frac{P}{F_i}$, а в момент руйнування $P = P_k$; $F_i = F_k$.

В кінцевому випадку маємо:

$$\sigma^i = S_k; \quad e_p = \ln \frac{1}{1 - \psi} \quad (2.9)$$

Перед тим, як перейти до коректного визначення механічних характеристик, випробують 2-3 зразки, будують діаграми деформування та визначають наближені значення механічних характеристик. На рис. 2.15 показаний загальний вигляд вторинних діаграм деформування для матеріалів різних класів, що обробляються для визначення характеристик міцності та пластичності, а на рис. 2.16 – схематизовані діаграми, що використовуються для спрощення розрахунків у області пружнопластичного деформування.

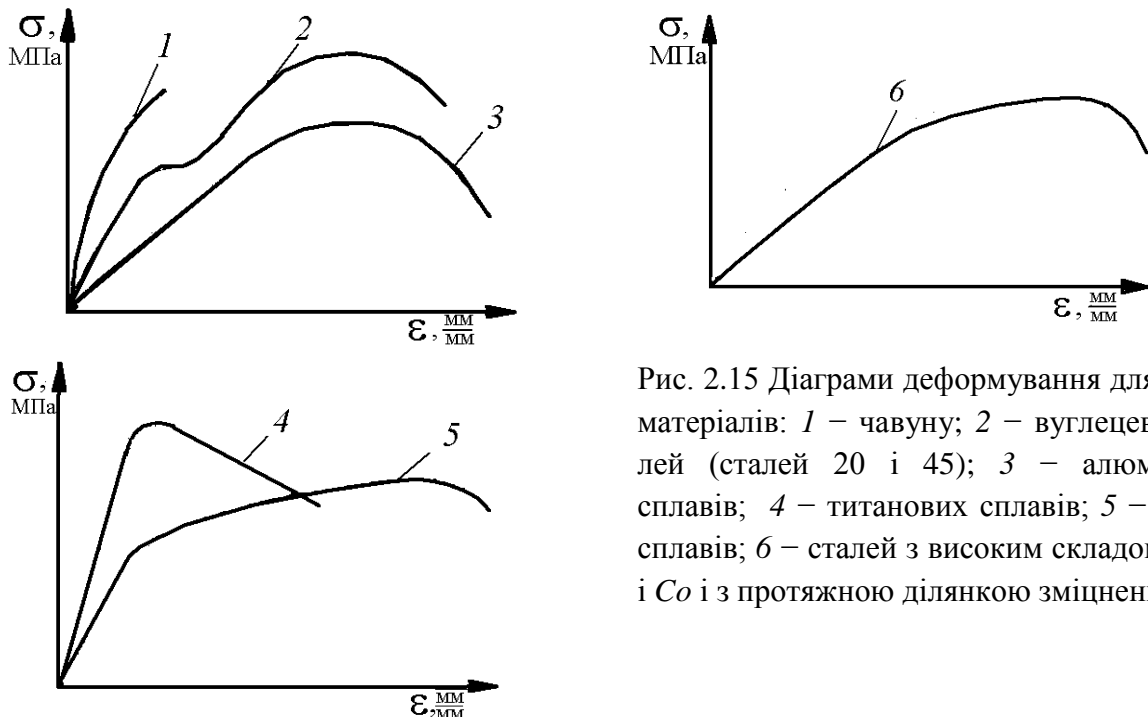


Рис. 2.15 Діаграми деформування для різних матеріалів: 1 – чавуну; 2 – вуглецевих сталей (сталей 20 і 45); 3 – алюмінієвих сплавів; 4 – титанових сплавів; 5 – мідних сплавів; 6 – сталей з високим складом Cr , Ni і Co і з протяжною ділянкою зміцнення

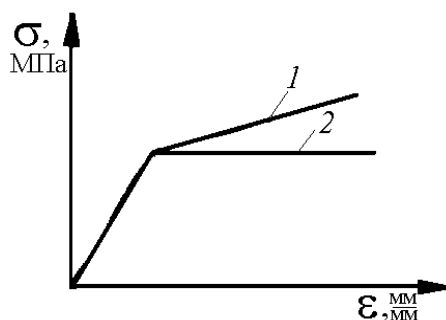


Рис. 2.16 Спрощені діаграми:
1 – з лінійним зміцненням;
2 – з ідеальною плинністю

За випробувань на розтяг згідно з рекомендаціями стандартів при визначенні всіх механічних характеристик масштаб діаграм деформування необхідно приймати за деформаціями, що відповідають 50:1, а за навантаженням 1 мм діаграми повинен відповідати зусиллю $P = 10 \text{ МПа} \cdot F_0$.

Визначення границі пропорційності $\sigma_{пц}$.

При визначенні границі пропорційності використовуються два методи. Основний - **інструментальний метод**, при реалізації якого деформація визначається за допомогою тензометрів. Другий метод – **графічний**, в рамках якого границя пропорційності визначається за допомогою обробки діаграми деформування. Більш точним методом є інструментальний, тому його використання є кращим.

Інструментальний метод визначення $\sigma_{пц}$

Реалізація інструментального методу ґрунтується на застосуванні механічних та оптичних тензометрів і виконується за такими етапами:

- зразок встановлюється у захват випробувальної машини та навантажується до навантаження P , що відповідає $0,1 P_{пц}^{оч}$ (очікуване значення навантаження границі пропорційності, визначене при попередніх випробуваннях).

- на навантажений зразок встановлюється тензометр і здійснюється поетапне навантаження за 4 кроки до значення $P = (0,7 \dots 0,8) P_{пц}^{оч}$.

- далі зразок навантажується через кроки $\Delta P = 2 \text{ кг/мм}^2 (20 \text{ МПа}) \cdot F_0$ до $P_{пц}^{оч}$; при цьому фіксується деформація, яка має бути однакою на окремих кроках навантаження (пружна); якщо деформація на черговому кроці перевищить середню пружну деформацію у 2...3 рази випробування припиняється та розраховується середня пружна деформація $(\Delta l_{пр})_{ср}$ до припинення випробувань;

– визначаємо допуск на пружну деформацію $[\Delta l]_{np}$ як $[\Delta l]_{np} = 1,5(\Delta l_{np})_{cp}$ згідно рекомендацій ГОСТ 1497-84 з урахуванням допустимої зміни тангенсу кута нахилу на 50 % [6].

За навантаження, що відповідає границі пропорційності, приймається навантаження на першому кроці після перевищення пружною деформацією допустимої деформації, а границя пропорційності приймається рівною

$$\sigma_{nc} = \frac{P_{nc}}{F_0}$$

Це найточніший метод визначення; він називається методом ступінчастого навантаження. При реалізації цього методу потрібно використовувати тільки такі випробувальні машини, які дозволяють виробляти ступінчасте навантаження зразка з часом витримки на кожному кроці до 5-7 с.

Графічний метод визначення σ_{nc}

При застосуванні цього методу необхідно проводити випробування із записом діаграми деформування зразка. Процедура графічного визначення σ_{nc} така:

– після вибору початку координат і проведення осей P і Δl при навантаженні, що відповідає $\sim 0,5 P_{nc}^{ox}$, проводимо пряму лінію mp , паралельну осі абсцис, і відкладаємо відрізок $nk = \frac{1}{2} mn$, рис. 2.17.

– через точки O і k проводимо пряму OF , після чого проводимо пряму AB , паралельну OF , таким чином, щоб вона торкалася кривої розтягу в точці C , ордината якої відповідає навантаженню границі пропорційності P_{nc} .

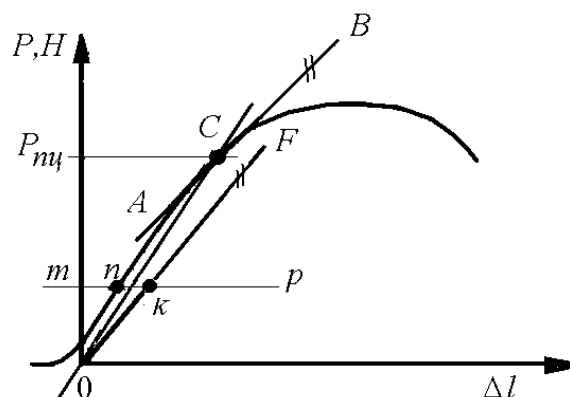


Рис. 2.17 Схема визначення границі пропорційності методом 50% дотичної

Цей метод визначення границі пропорційності називається методом 50%-дотичної, напруження що відповідає границі пропорційності визначається як $\sigma_{nc} = P_{nc} / F_0$.

Визначення границі пружності $\sigma_{0,05}$

При визначенні границі пружності $\sigma_{0,05}$ використовуються два методи: інструментальний метод (метод ступінчастого розвантаження) та графічний метод за допомогою діаграм деформування. У цьому випадку масштаб приймається таким самим, як і при визначенні σ_{nc} .

Допуск на залишкову деформацію для $\sigma_{0,05}$ становить $\varepsilon_{3l} = 0,05\%$; для високоточних вимірів стандартом допускається встановлювати $\varepsilon_{3l} = 0,005\%$. Для зразків із довжиною робочої ділянки $l_0 = 100$ мм ($d_0 = 10$ мм), при допуску 0,05 %, абсолютне значення залишкової деформації становить $\Delta l_{3l} = 0,05$ мм, якому відповідає на діаграмній стрічці відрізок 2,5 мм.

Інструментальний метод визначення $\sigma_{0,05}$

Порядок реалізації цього методу приймається таким:

- зразок встановлюється в захвати випробувальної машини і навантажується до навантаження $P = 0,1 P_{0,05}^{оч}$;

- на зразок встановлюється тензометр;

- до значення навантаження $P = (0,7 \dots 0,8) P_{0,05}^{оч}$ проводиться навантаження в 4 етапи з подальшим розвантаженням; у момент розвантаження фіксується Δl_{3l} за тензометром; розвантаження робимо до $P = 0,1 P_{0,05}^{оч}$;

- в інтервалі навантажень від $P = (0,7 \dots 0,8) P_{0,05}^{оч}$ до $P = P_{0,05}^{оч}$ зразок навантажуємо ступінчато по 2 кг/мм^2 (20 МПа) $\cdot F_0$ з наступним розвантаженням та фіксуємо залишкові деформації; при досягненні значення залишкової деформації, що відповідає 0,05%, фіксуємо розрахункове навантаження

$$P = P_{0,05} \text{ та за її величиною визначаємо межу пружності } \sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}.$$

За такого методу визначення границі пружності час витримки на кожній стадії навантаження повинен бути не більшим 5...7 сек, щоб виключити прояв пружної післядії.

Графічний метод визначення $\sigma_{0,05}$

При реалізації цього методу записується діаграма деформування, рис. 2.18, далі в прийнятому масштабі відкладається величина залишкової дефор-

мації, що відповідає 0,05 % l . При довжині робочої ділянки зразка $l_0 = 100$ мм та масштабі 50:1 залишкова деформація відповідає на діаграмі відрізка 2,5 мм.

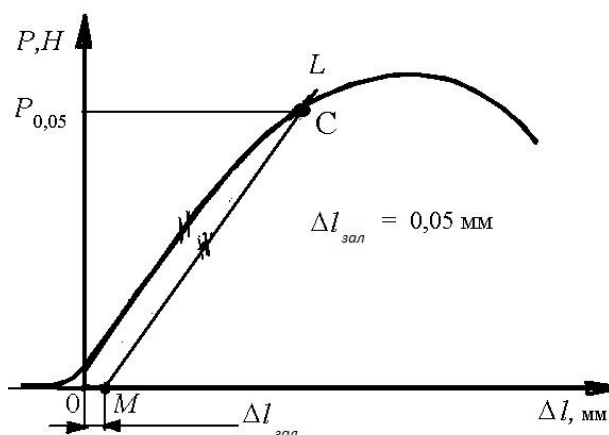


Рис. 2.18 Схема визначення границі пружності

Далі через точку абсциси M , рівну 2,5 мм, проводимо пряму ML , паралельну лінійній ділянці діаграми деформування, до перетину її з діаграмою деформування в точці границі пружності C . Ордината цієї точки відповідає навантаженню границі пружності $P_{0,05}$, за значенням цієї величини визначаємо

$$\sigma_{0,05} \text{ як } \sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}.$$

Визначення умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$

Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ визначається для матеріалів, діаграми деформування яких не мають площадки плинності. Також як і при визначенні границі пружності $\sigma_{0,05}$ використовуються описані вище методи: інструментальний (ступінчастого розвантаження) і графічний.

В Україні відповідно до ГОСТ 1497-84 та ДСТУ 7305:2013 [6, 20] допуск на залишкову деформацію при розвантаженні приймається рівним 0,2 %; в інших країнах він змінюється в межах від 0,2 до 0,5%, а для високопластичних аустенітних сталей він становив 1,0%, рис. 2.19, що дозволяло при розрахунках суттєво збільшити межу плинності та знизити матеріаломісткість конструкцій, які виготовляються із цих сталей.

Інструментальний та графічний методи визначення реалізуються так са-

$$\text{мо, як і при визначенні } \sigma_{0,05}: \sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}.$$

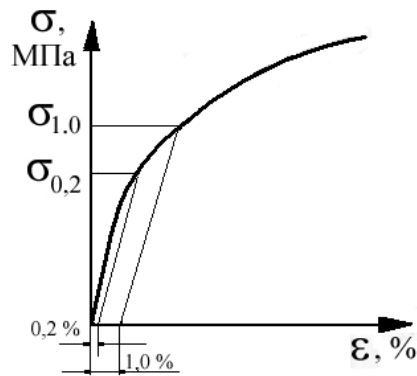


Рис. 2.19 Умовна границя плинності з допуском 0,2 и 1,0 %

Тільки при здійсненні графічного методу по осі ординат у масштабі 50:1 для залишкової деформації 0,2% при робочій довжині зразка $l_0 = 100$ мм на діаграмі деформування відкладається відрізок довжиною 10 мм, рис. 2.20.

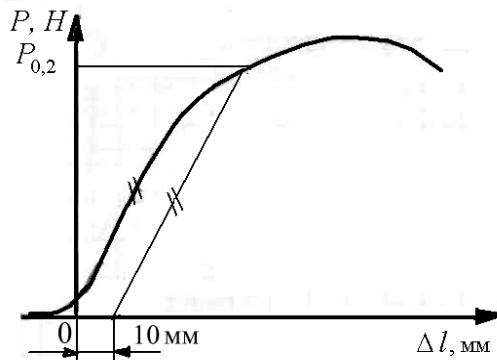


Рис. 2.20 Схема визначення умовної границі плинності

Визначення фізичної границі плинності σ_T

Фізична границя плинності визначається лише для матеріалів, на діаграмі яких є площадка текучості. Використовується два методи визначення: інструментальний – за показаннями стрілки приладу силівимірювальної машини та графічний – за результатами запису діаграм деформування.

При реалізації інструментального методу зразок безперервно навантажується до тих пір, поки не зафіксовано постійне навантаження P_T при деформації, що збільшується, рис. 2.21.

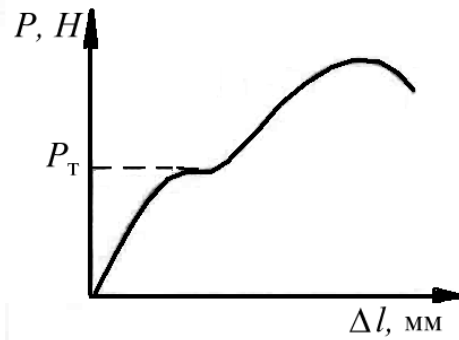


Рис. 2.21 Діаграма деформування з зоною плинності

Це навантаження відповідає фізичній границі плинності і його значення визначається як $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$.

Якщо на діаграмі деформування спостерігається перегин, то стандарт рекомендує визначати P_T як ординату, що відповідає навантаженню переходу від ділянки опуклості до ділянки увігнутості діаграми в області перегину, рис.2.22.

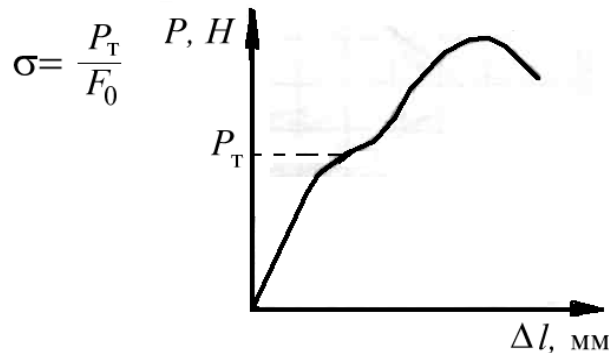


Рис. 2.22 Діаграма деформування з перегином в області плинності

При формуванні зуба плинності визначаються також значення верхньої та нижньої меж плинності, рис. 2.23:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}; \sigma_{в.т.} = \frac{P_{в.т.}}{F_0}; \sigma_{н.т.} = \frac{P_{н.т.}}{F_0}.$$

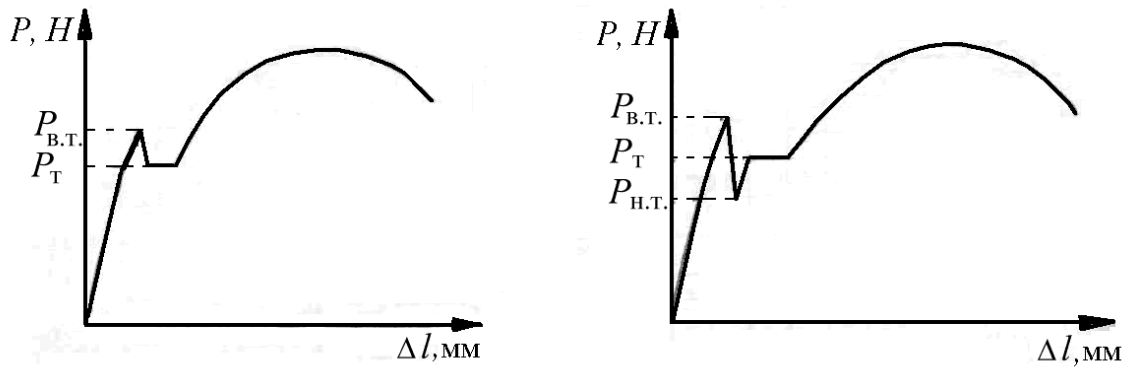


Рис. 2.23 Діаграми деформування з зубами плинності ($P_{в.т.}$ – навантаження верхньої границі плинності і $P_{н.т.}$ – нижньої границі плинності)

Для матеріалів, у яких на діаграмах реєструється переривчаста плинність, звана ефектом Портевена-Ле Шательє, навантаження визначається як відповідне провалу другого зуба, рис. 2.24.

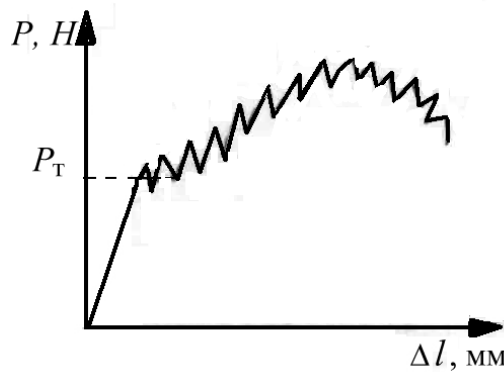


Рис. 2.24 Діаграма деформування за переривчастої плинності матеріалу

Визначення границі міцності (тимчасового опору) σ_e

Границя міцності (тимчасовий опір) - це напруження, що відповідає максимальному навантаженню до руйнування зразка P_{max} , рис. 2.25. Використовується два методи його визначення: інструментальний та графічний. При здійсненні інструментального методу за показаннями силовимірювача випробувальної машини визначається значення максимального навантаження P_{max} . При реалізації графічного способу величина P_{max} визначається на діаграмі деформування, рис. 2.25; при цьому $\sigma_e = \frac{P_{max}}{F_0}$.

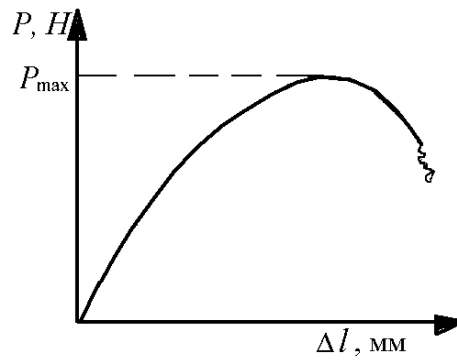


Рис. 2.25 Схема визначення границі міцності

Визначення істинного опору руйнуванню S_k

Ця характеристика міцності визначається лише графічним методом, за навантаженням, що відповідає моменту поділу зразка на дві частини, віднесеного до площі поперечного перерізу зразка в перерізі руйнування, рис.

2.26. Тобто це істинне напруження в момент руйнування зразка: $S_k = \frac{P_k}{F_k}$.

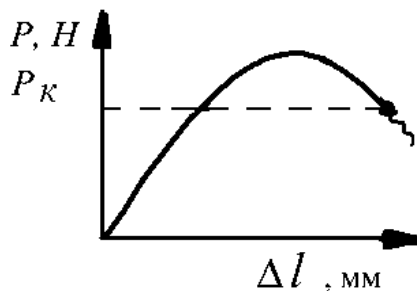


Рис. 2.26 Схема визначення істинного опору розриву

Визначення характеристик пластичності δ і ψ при випробуваннях на короткочасний розтяг

При оцінці пластичності конструкційних матеріалів використовуються дві табличні характеристики - відносне видовження після розриву δ та відносне звуження після розриву ψ . Відносне видовження після розриву δ визначається як відношення абсолютного збільшення розрахункової довжини зразка Δl_k до її вихідної довжини l_0 :

$$\delta = \frac{\Delta l_k}{l_0} = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% .$$

Ця характеристика визначається інструментальним та графічним методами.

При реалізації інструментального методу повне видовження зразка Δl_k визначається за результатами вимірювання на мікроскопі довжини зразка на

робочій ділянці для двох зістикованих і закріплених, наприклад, за допомогою клеєвих стрічок частин зруйнованого зразка.

Графічний метод визначення δ ґрунтується на записі первинної діаграми деформування, рис. 2.27, та проведення з точки A прямої AB , паралельної ділянці пружного деформування діаграми до перетину з віссю абсцис у т. B . Відрізок OB на осі абсцис відповідає абсолютному приросту деформації зразка Δl_k на робочій довжині l_0 .

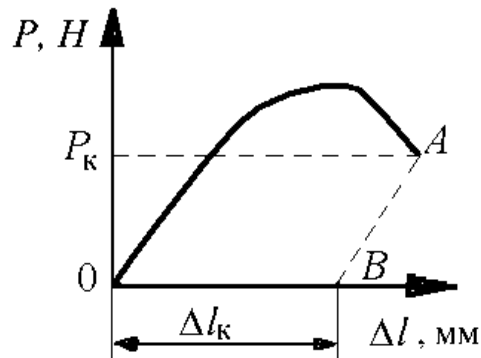


Рис. 2.27 Схема визначення відносного видовження після розриву.

Відносне звуження після розриву ψ визначається лише інструментальним методом за результатами вимірювань для циліндричних зразків середнього діаметра d_k у перерізі руйнування з подальшим обчисленням площі поперечного перерізу F_k . Визначення відносного звуження після розриву не рекомендується для зразків з формою поперечного перерізу робочої частини зразка, яка відрізняється від циліндричної (прямокутної, овальної тощо) відповідно до стандарту ГОСТ 1497-84 [6]. У разі необхідності визначення ψ для плоских зразків можна виконувати лише за умови виконання рекомендацій ГОСТ 1497-84.

Випробування на розтяг крихких матеріалів

Для таких матеріалів визначається лише границя міцності (руйнівне напруження), так як діаграми деформування містять лише ділянки пружного деформування, рис. 2.28.

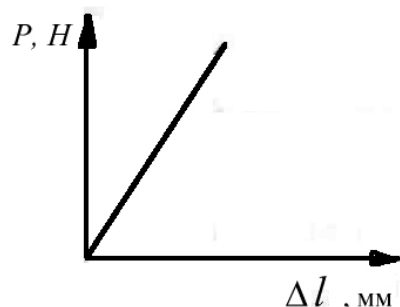


Рис. 2.28 Первинна діаграма деформування для крихких матеріалів

Методичні недоліки випробування крихких матеріалів пов'язані з тим, що крихкі матеріали дуже чутливі до неспіввісного прикладення навантаження і ці матеріали дуже чутливі до контактних напружень, що виникають у поверхневих шарах конічних головок, які використовуються у зразках з крихких матеріалів для їх центрування в захватах та передачі навантаження на робочу ділянку. На рис. 2.29 показана конструкція такого зразка з робочими конічними поверхнями.

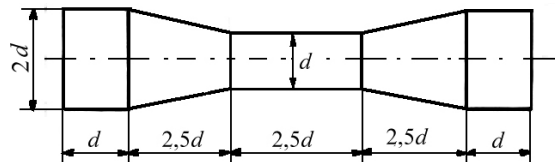


Рис. 2.29 Циліндричний зразок із крихкого матеріалу для випробувань на розтяг

Недоліком циліндричних зразків є також те, що їх виготовлення пов'язане з токарною обробкою, при якій висока ймовірність крихкого руйнування зразка в процесі виготовлення. В даний час такі зразки для випробувань практично не використовуються. Альтернативою їм є призматичні зразки, вільні від перерахованих вище недоліків виготовлення та навантаження, рис. 2.30.

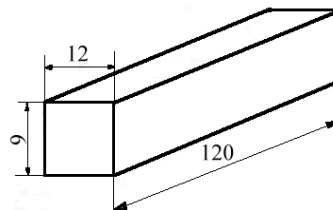


Рис. 2.30 Призматичний зразок з крихкого матеріалу для випробування на розтяг

Схема закріплення таких зразків у захватах та схема пристосування для їх розтягу проілюстровані на рис.2.31.

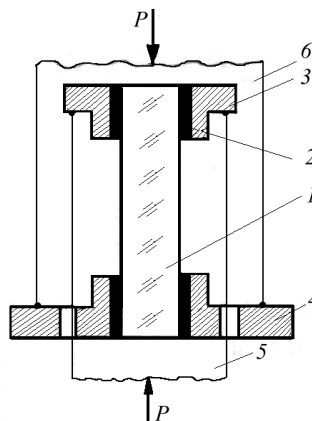


Рис. 2.31 Схема навантаження призматичних зразків:

1 – зразок (скло, сітал); 2 – шар епоксидної смоли; 3, 4 – втулки, в які вклеюється зразок; 5, 6 – розрізні стакани

Призматичні зразки, рис. 2.30, випробовуються на розтяг з використанням випробувальних машин, що розвивають стискуючі навантаження, перетворення яких на розтягувальні для зразка здійснюється за допомогою реверсорів, що складаються з розрізних стаканів 5 і 6, рис. 2.31, які, впливаючи на втулки 3 та 4, викликають розтягнення зразка 1.

Зразок вклеюється в ці втулки за допомогою епоксидної смоли в рідкому стані, що не перешкоджає його встановленню співвісно зі стаканами при попередньому таруванні. Розрахункова довжина робочої ділянки таких зразків l_0 становить 40...60 мм, що забезпечує цілісність шару епоксидної смоли при навантаженні

Випробування полімерів проводять на основі вимог стандарту ГОСТ 25.601-80 «Методи механічних випробувань композиційних матеріалів із полімерною матрицею (композитів). Метод випробувань плоских зразків на розтяг при нормальній, підвищеній та зниженій температурах» [12].

Зразки для випробувань на розтяг при динамічному навантаженні

Тільки в інтервалі швидкостей навантаження 1...25 м/с можна забезпечити однорідність напруженого стану на робочій ділянці зразка при динамічних випробуваннях на розтяг. Отже, у цьому інтервалі забезпечується сумісність отриманих при динамічному навантаженні характеристик міцності та пластичності та характеристик міцності та пластичності, які визначаються при статичних випробуваннях на короткочасну міцність. Тому при випробуваннях циліндричних зразків в умовах динамічного розтягу при швидкостях до 25 м/с можна отримувати табличні значення характеристик міцності та пластичності. Але для цього інтервалу швидкостей необхідно враховувати можливість прояву двох динамічних ефектів, що призводять до порушення однорідності напруженого стану на робочій ділянці [43]. Перший ефект пов'язаний із виникненням інерційних радіальних сил q при дії осьового навантаження P , рис. 2.32, а другий – з можливістю інтерференції на робочій ділянці зразка при ударному навантаженні прямих та відбитих пружних хвиль.

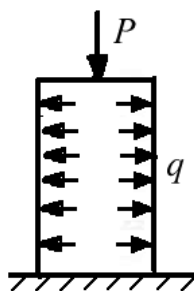


Рис. 2.32 Схема виникнення інерційних сил за ударного стиску

Подолання дії першого ефекту забезпечується використанням циліндричних зразків діаметром, що не перевищує 4...6 мм, а другого - включенням у силовий ланцюжок зразка хвилеводів такої довжини, щоб забезпечувати час пробігу пружної хвилі від зразка туди і назад більший, ніж час, необхідний для руйнування зразка. Схема вузла навантаження зразка з урахуванням забезпечення цієї вимоги наведена на рис. 2.33. Тут швидкість навантаження $V = \sqrt{2qh}$, де h - висота падіння вантажу.

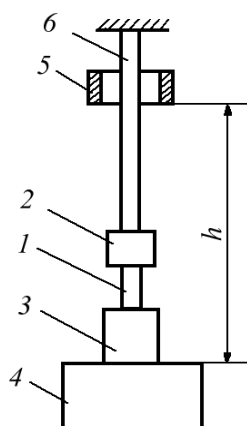


Рис. 2.33 Схема навантаження: 1 – зразок; 2,3 – захвати; 4 – наковальня; 5 – вантаж; 6 – хвилевід

Очевидно, що якщо час руйнування зразка буде більшим, ніж час проходження хвилі туди і назад, то руйнування відбуватиметься з накладенням прямих і відбитих хвиль в умовах напруженого неоднорідного стану. При цьому для зразків з великою довжиною робочої ділянки руйнування може локалізуватися не в одній, а у двох шийках.

Тому в установках для динамічних випробувань використовуються довгі хвилеводи та короткі зразки, рис. 2.34 (якщо $V > 25$ м/с, то довжина хвилеводу не допоможе). Нині основне застосування отримали зразки з початковим діаметром трохи більше 4 мм, рис. 2.34а; зразки із малою довжиною робочої ділянки, рис. 2.34б, в даний час не використовуються.

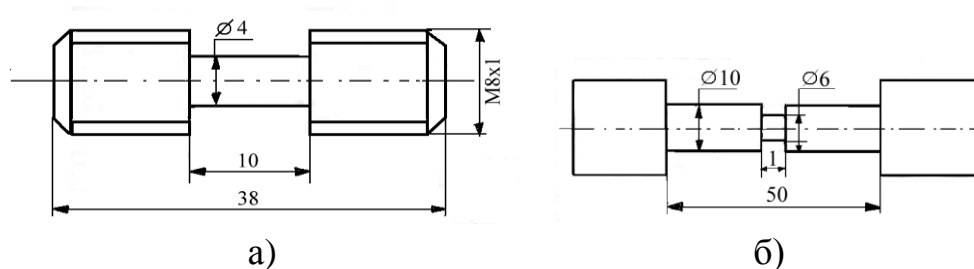


Рис.2.34 Зразки для випробування на динамічний розтяг

В даний час відсутні нормативні документи (стандарти), які б регламентували методи випробувань на розтяг зразків із крихких матеріалів і зразків при динамічному навантаженні. Використання розглянутих вище типів зразків та особливостей їх випробувань ґрунтуються на виконаних в останні 2...3 десятиліття розробках, які широко висвітлені в сучасній технічній літературі і ці підходи є загальноприйнятими [43].

Методи традиційних випробувань на короточасну міцність регламентовані вищезазначеними стандартами, які гармонізовані зі стандартами технічно розвинених країн зарубіжжя.

2.4.2 Випробування на стиск та згин

Випробуванням на стиск піддаються металеві та крихкі неметалеві матеріали. Основними ці випробування є для таких матеріалів як деревина, цегла, камінь, бетон, скло, ситали, кераміка, чавуни, високовуглецеві сталі. Типові діаграми деформування за стиску деяких металів і сплавів наведено на рис. 2.35.

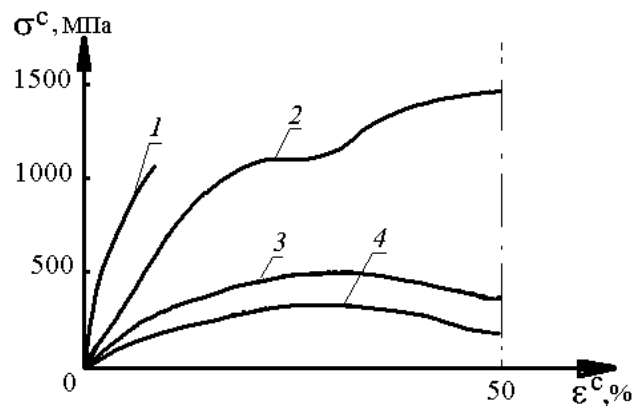


Рис. 2.35. Діаграми деформування за стиску: 1 – чавун; 2 – вуглецева конструкційна сталь з середньою пластичністю; 3 – цинк; 4 – свинець

Для пластичних матеріалів випробування припиняються при досягненні деформації 50%, якщо не відбулося руйнування, рис. 2.35. Це пов'язано з тим, що за подальшого стискання відбувається «сплющування» зразка завдяки формуванню конусів нестискуваності в зонах контакту опорних площин зразка з навантажувальними плитами, рис. 2.36, які входять у контакт при деформаціях понад 50 %, що спричиняє порушення однорідності напруженого стану та призводить до невизначеності характеристик міцності та пластичності при стисканні. Методи випробування металевих матеріалів на стиск регламентовані стандартом ГОСТ 25.503-80 [13]. При стисканні визначаються такі характеристики, як σ_{nc}^c , $\sigma_{0,05}^c$, $\sigma_{0,2}^c$, σ_T^c , σ_σ^c , E^c (МПа).

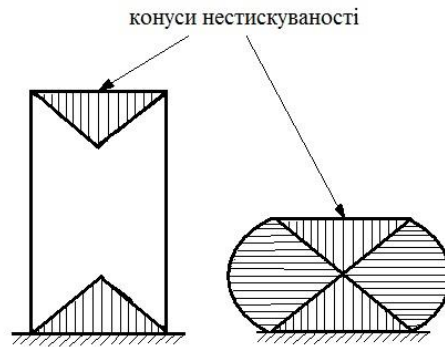


Рис. 2.36 Схема виникнення конусів нестискуваності при стиску

До форми металевих зразків, технології їх виготовлення та методики проведення випробувань відповідно до стандарту пред'являються такі вимоги:

- допускається використання лише циліндричних зразків, виготовлених на токарному верстаті;
- при виготовленні зразків повинна забезпечуватися перпендикулярність осі зразка до торців та строга паралельність торців між собою;
- твердість плити повинна бути більшою за твердість зразка $HRC_{\text{плити}} \geq HRC_{\text{зразка}} + 5$, щоб виключити ідентування зразка в плиту;
- одна з плит, через яку передається навантаження на зразок, повинна мати сферичну опору для виключення перекосів при навантаженні зразка, рис. 2.37.

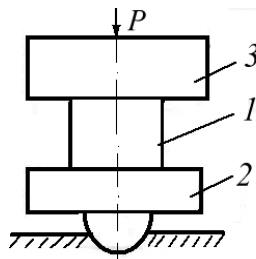


Рис. 2.37 Схема установки нижньої плити на сферичній опорі: 1 – зразок; 2 – плита нижня з сферичною опорою; 3 – плита верхня

Зразки для випробування на стиск

Рекомендується використовувати при випробуваннях такі типи зразків, кожен із яких орієнтований на визначення окремих механічних характеристик, рис. 2.38 (d_0 і h_0 – вихідні діаметр та висота зразка):

- тип I: $d_0 = 20$ мм; $h_0 = 8d_0 = 160$ мм – це 8-ми кратні зразки, призначені для визначення модуля пружності першого роду при стисканні ;
- тип II: $d_0 = 10 \dots 30$ мм (інтервал через 5 мм); $h_0 = 3d_0$; з використанням зразків цього типу визначаються σ_{m}^c ; $\sigma_{0,05}^c$;

- тип III: $d_0 = 10 \dots 30$ мм; h_0 вибирається за ГОСТом; визначаються σ_e^c ; $\sigma_{0,2}^c$ σ_T^c ;;
- тип IV: $d_0 = 10 \dots 30$ мм; h_0 вибирається за ГОСТом; зразки цього типу використовуються для побудови діаграм деформування при стисканні.

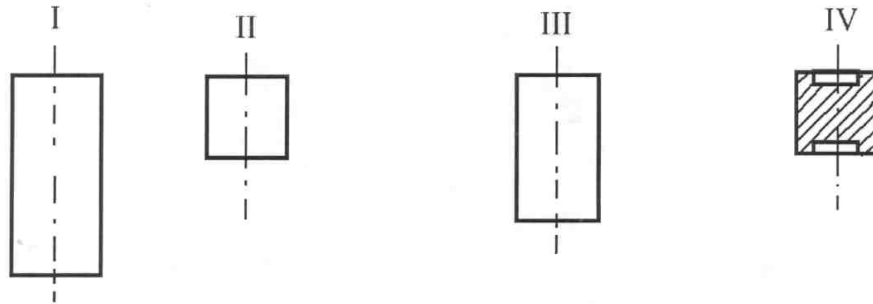


Рис. 2.38 Зразки з металевих матеріалів для випробувань на стискання: тип I та II – змащування торців не допускається, торці мають бути знежирені; тип III – допускається мастило (машинне масло); тип IV - обов'язкове змащення торців (парафін, стеарин)

Визначення механічних характеристик під час випробувань на стиск

При визначенні модуля пружності першого роду використовуються зразки I-го типу. Масштаб при випробуваннях на стиск приймається за деформаціями 200:1, а за навантаженням P , так само як і при розтязі, 1 мм діаграми повинен відповідати 10 МПа F_0 , тобто масштаб за навантаженням: 1:10 МПа F_0 .

E^c визначається інструментальним методом з використанням тензометрів у такому порядку:

- навантажуюємо зразок до навантаження $P^c = 0,1 (P_{ну}^c)^{оч}$ та встановлюємо тензометр;

- до навантаження, що відповідає очікуваній границі пропорційності $(P_{ну}^c)^{оч}$, навантаження проводимо малими кроками $\Delta P^c = 0,1 (P_{ну}^c)^{оч}$, рис. 2.39.

У процесі такого навантаження відраховуємо величину деформації стиску Δh^c на кожному кроці навантаження, після чого визначаємо середнє Δh_{cp}^c ,

як $\Delta h_{cp}^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h^c$, де $n = 7 \dots 8$, і з урахуванням цього значення розраховуємо значення E^c .

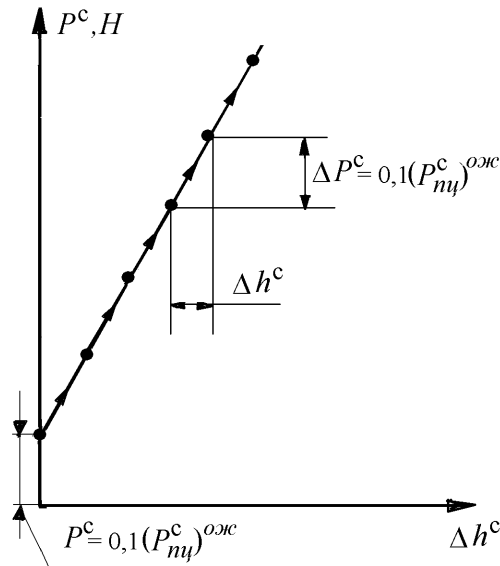


Рис. 2.39 Схема випробування на стиск при визначенні модуля нормальної пружності

Так як $E^c = \frac{\sigma^c}{\varepsilon^c}$, $\sigma^c = \frac{\Delta P^c}{F_0}$ і $\varepsilon^c = \frac{\Delta h_{cp}^c}{h_0}$, то в кінцевому рахунку отримаємо: $E^c = \frac{\sigma^c}{\varepsilon^c} = \frac{\Delta P^c \cdot h_0}{F_0 \cdot \Delta h_{cp}^c}$, де h_0 і F_0 - початкова розрахункова довжина та площа поперечного перерізу зразка першого типу у вихідному стані.

Визначення границі пропорційності σ_{nc}^c

Границя пропорційності за стискання σ_{nc}^c визначається двома способами: інструментальним (за допомогою тензометрів) методом ступінчастого навантаження та графічним (методом 50%-дотичною), ці методи подібні до методів випробувань на розтяг.

Основний метод – інструментальний.

Визначення значень $\sigma_{0,05}^c$, $\sigma_{0,2}^c$ і σ_T^c проводиться так як і при випробуваннях на розтяг двома способами: інструментальним і графічним (див. розтяг); основний спосіб – інструментальний.

Випробування на стиск крихких матеріалів

Стандарту на випробування неметалевих матеріалів, які використовуються у машинобудуванні, немає. Випробування на стиск крихких матеріалів прийнято проводити за допомогою зразків призматичної, кубічної (бетон, цегла, камінь, деревина) та циліндричної форми (ситал, скло, кераміка). При випробуваннях ситалу і скла також використовуються зразки трубчастої форми.

Для цих матеріалів руйнування може відбуватися за рахунок сколювання опорних поверхонь. Тому для запобігання такому небажаному явищу використовуються захвати з вклеюванням зразка за допомогою епоксидної смоли, рис. 2.40.

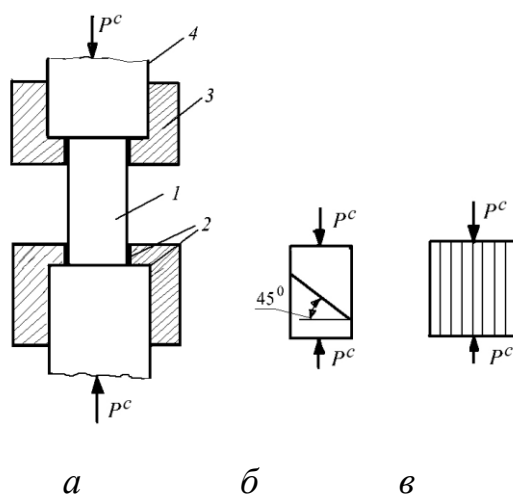


Рис. 2.40 Схема вклеювання зразка в захваті (а) (1 – зразок циліндричний, 2 – епоксидна смола, 3 – втулки, 4 – захвати) та характер руйнування чавуну з низькою пластичністю (б) та деревини (в)

Випробування на згин

Стандарту на ці випробування немає. Відповідно до загальноприйнятих підходів на згин проводяться випробування крихких матеріалів для визначення σ_s при згині (чавун, високовуглецеві інструментальні сталі, скло, ситали, кераміка; це основний вид випробувань скла, ситалу, кераміки) та випробування полімерних матеріалів, які в конструкції працюють на згин [21, 22, 23].

При цьому випробування на згин проводяться в умовах як поперечного, так і чистого згину, рис. 2.41 и рис. 2.42.

У 1856 році російський учений українського походження Журавський Дмитро Іванович запропонував формулу для розрахунку дотичних напружень при згині у вигляді $\tau = \frac{QS}{bJ_z}$,

$$\tau = \frac{QS}{bJ_z},$$

де Q - перерізна сила,

S - статичний момент площі відсіченого перерізу,

b - ширина прямокутного зразка,

J_z - осьовий момент інерції поперечного перерізу зразка.

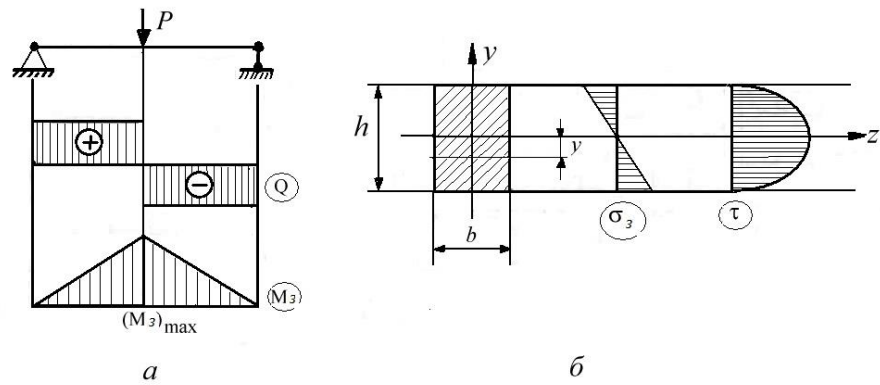


Рис. 2.41 Схема випробувань в умовах поперечного згину (а) та епюра згинальних та дотичних напружень (б) для прямокутного поперечного перерізу зразка

Нав'є у 1826 році опублікував перший підручник з опору матеріалів, в якому наведена формула для розрахунку згинальних напружень у вигляді $\sigma_u = \frac{M_i}{J_z} y$, де M_i - згинальний момент у перерізі, J_z - осевий момент інерції поперечного перерізу зразка і y - відстань від нейтральної осі до шару, що розглядається.

Для матеріалів, які деформуються пластично при випробуваннях на згин, в поверхневих шарах відбувається зниження напружень за рахунок появи пластичних деформацій, рис. 2.42в.

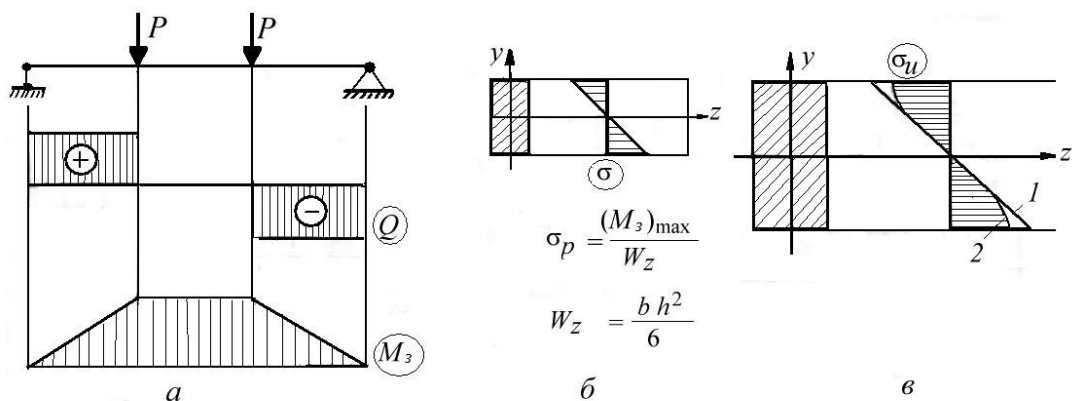


Рис. 2.42 Схема випробувань при чистому згині (а); епюра нормальних напружень (б) для прямокутного поперечного перерізу зразка при чистому згині; схема епюри нормальних напружень (в) для умов пружного – 1 та пластичного деформування матеріалу – 2

Тому нормальні напруження, що розраховуються за формулою Нав'є, для умов пружного деформування можуть значно перевершувати руйнівні.

Переваги випробувань на згин з визначення границі міцності для крихких матеріалів порівняно з випробуваннями на стиск - це простота обладнання та технології обробки зразків під час виготовлення. Загальнопринятими

при випробуваннях на згин є призматичні зразки розмірами 9x12x120 мм для крихких матеріалів, рис. 30, і $h \times 10 \times 80$ для полімерів. Якщо при випробуваннях на згин зразок не руйнується, то випробування припиняють при стрілі прогину $f \geq 1,5h$, рис. 2.43 (f - стріла прогину, h - висота зразка прямокутного перерізу).

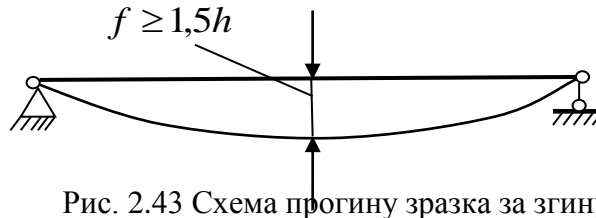


Рис. 2.43 Схема прогину зразка за згину

2.4.3 Випробування на кручення, визначення характеристик зсуву

Випробування на кручення

Випробування на кручення проводяться для визначення характеристик міцності і пластичності при зсуві відповідно до стандарту ГОСТ 3565-58 [14].

Щоб визначити механічні характеристики для умов зсуву, необхідно будувати діаграми деформування в координатах $\tau - \gamma$. Так як прямі випробування на зсув неможна виконати, для визначення характеристик зсуву проводять випробування на кручення, яке є окремим випадком чистого зсуву при плоскому напруженому стані.

Випробування на кручення проводяться з використанням зразків круглого поперечного перерізу, на які встановлюються тензорезисторні перетворювачі крутного моменту і кутових переміщень, що дозволяють в процесі навантаження записувати машинні (первинні) діаграми деформування в координатах $M_k - \Delta\varphi$ (тут M_k - крутний момент і $\Delta\varphi$ - кут закручування стержня на базі виміру), рис. 2.44а. Ці діаграми перебудовуються в робочі (вторинні) діаграми $\tau - \gamma$ (τ - дотичні напруження, γ - зсув відносний при крученні), рис. 2.44б, які використовуються для визначення графічним методом зсувних характеристик міцності.

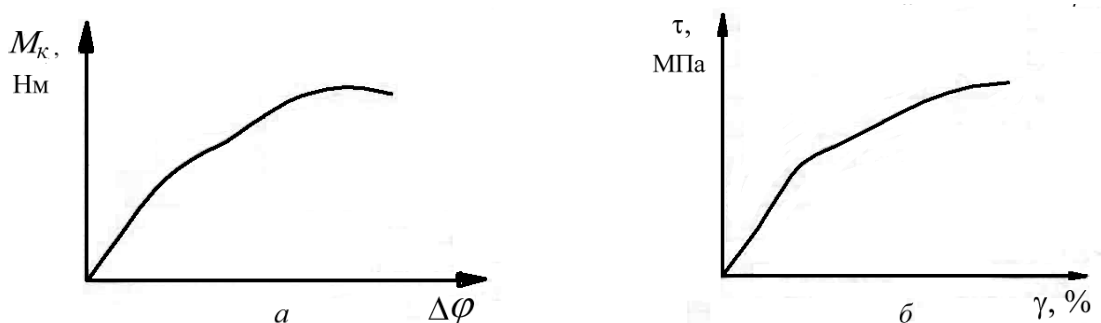


Рис. 2.44 Діаграми деформування за кручення:
а - первинні (машинні) і б - вторинні

Тут $\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}$, а $\gamma = \frac{\varphi_{II} - \varphi_I}{l} \cdot \frac{d}{2}$ – дотичні напруження та зсувні деформації

в поверхневому шарі циліндричного зразка при крученні W_p , – полярний момент опору, $\varphi_{II} - \varphi_I = \Delta\varphi$ – кут закручування зразка на базі виміру і d – діаметр зразка.

Схема деформування елемента циліндричного стрижня довжиною l між перерізами I – I і II – II, а також напрямок головних напружень σ_1 і σ_3 , що діють на елементарні площадці $\tau = 0$, проілюстровані на рис. 2.45а, та рис. 2.45б.

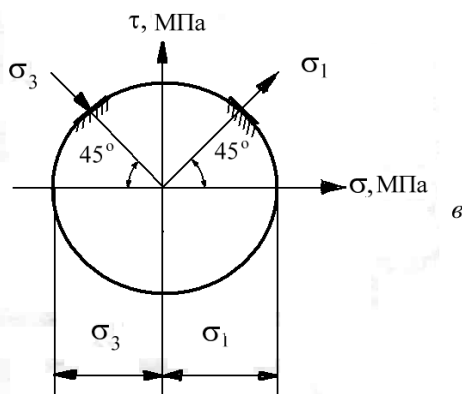
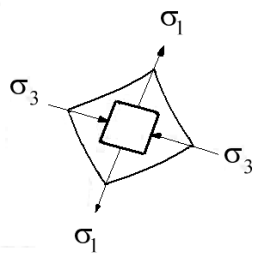
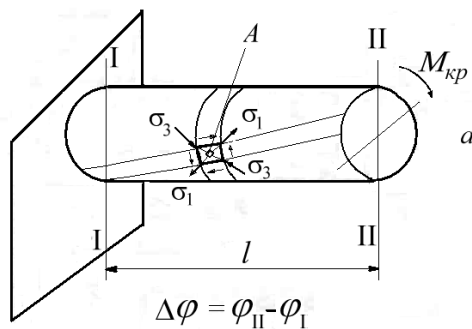


Рис.2.45 Напружений стан на поверхні циліндричного стержня при крученні:

а – схема навантаження стрижня з елементом A ;

б – напрямок дії головних напружень в елементі A ;

в – коло Мора для виділеного елемента A – чистий зсув

Як впливає із аналізу кола Мора, рис. 2.45в, побудованого для даного випадку навантаження, головні напруження σ_1 і σ_3 спрямовані під кутом 45° до твірної циліндричного стержня, а при $\sigma_1 = 0$ і $\sigma_3 = 0$ дотичні напруження будуть максимальними і, отже по відповідним площадкам, перпендикулярним і паралельним осі зразка, реалізуються умови чистого зсуву.

Дотичні напруження τ для круглого поперечного перерізу діаметром d під дією крутного моменту M_k визначаються як $\tau = \frac{M_k}{J_p} \rho$, де J_p - полярний момент інерції для круглого перерізу $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$, а ρ - відстань від осі стержня до аналізованої площадки перерізу, для якої визначаються дотичні напруження, рис. 2.46. Так на осі циліндра $\rho = 0$, а $\rho_{\max} = \frac{d}{2}$, еюра дотичних напружень для розглянутого випадку суцільного перерізу стержня буде обмежена прямою, що проходить через вісь ($\tau = 0$) до зовнішніх волокон перерізу, де $\rho_{\max} = \frac{d}{2}$, $\tau = \tau_{\max} = \frac{M_k}{J_p} \cdot \frac{d}{2}$, рис. 2.46.

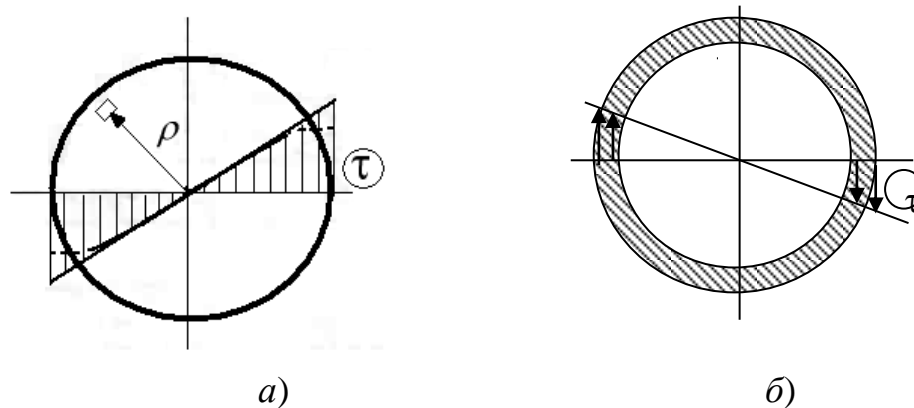


Рис. 2.46 Еюра дотичних напружень для циліндричного суцільного стержня круглого поперечного перерізу за кручення *a*) та трубчатого зразка *б*)

Якщо зовнішні волокна перерізу пластично деформуються, то напруження, розраховані за наведеною вище формулою для умов пружного деформування, будуть більшими за дійсні, еюра яких показана на рис. 2.46 штриховою лінією.

Таким чином, недолік суцільних зразків пов'язаний з тим, що матеріал у різних перерізах деформується, по-перше, в умовах неоднорідного напруженого стану, і по-друге, на поверхні зразка може відбуватися пластичне деформування, а за ГОСТ 3565-58 це заборонено.

Подолати перший недолік, пов'язаний з неоднорідністю напруженого стану можна шляхом використання трубчастих зразків. При віддаленій серцевині напружений стан у стінках під дією крутного моменту, вважається однорідним, рис. 2.47.

Другий недолік обходять, використовуючи для визначення дійсних (істинних напружень) τ_k наближену формулу, яка буде наведена нижче.

За випробувань на кручення визначаються такі характеристики зсуву:

G (МПа) – модуль зсуву;

γ (%) - зсув відносний за кручення;

$\tau_{пч}$ - границя пропорційності за кручення,

$\tau_{ум}$ - границя пружності за кручення (0,0045%; 0,0075%; 0,015%);

$\tau_{0,3}$ – умовна границя плинності за кручення;

τ_k - істина границя міцності за кручення;

$\tau_{пч}$ – умовна границя міцності під час кручення.

Зразки, що використовуються для випробувань на кручення

При крученні випробовуються зразки круглого поперечного перерізу з мінімальним діаметром $d_{\min} = 5$ мм. В якості основного стандарт [14] рекомендує циліндричний суцільний зразок $d_0 = 10$ мм, $l_0 = 50$ і 100 мм. Допускається випробовувати трубчасті зразки діаметром до 20 мм із товщиною стінки не менше 1 мм.

Рекомендується перед випробуванням на зразок по твірній наносити лінію по всій розрахунковій довжині зразка, а розрахункову довжину фіксувати рисками по нормалі до осі. У перерізах, що відповідають рискам, встановлюються тензометри – дзеркальні тензометри Мартенса (зазвичай) з точністю 5 ЕОД.

Форма та розміри головок зразків не регламентуються і залежать від способу кріплення зразка у захватах випробувальної машини та властивостей матеріалу. Вони повинні не допускати прослизання, зминання поверхонь випробування та руйнування зразка в головках та на перехідних ділянках.

Визначення механічних характеристик при випробуваннях на кручення та ідентифікація характеру руйнування

При крученні циліндричних зразків може відбуватися руйнування трьох типів. **До першого типу** відноситься руйнування зсувом по площинах, нормальним до осі зразка, яке може реалізуватися тільки для ізотропних пластичних матеріалів, рис. 2.48 лінія I.

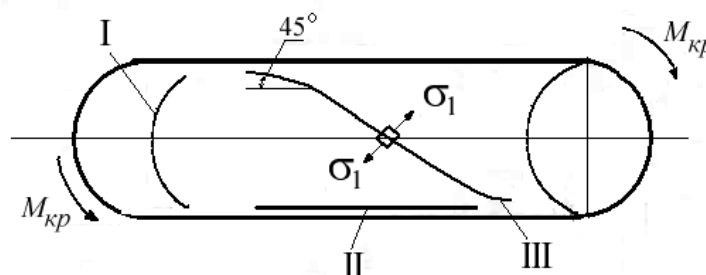


Рис. 2.48 Характер руйнування циліндричних стержнів за кручення

Другий тип руйнування (лінія II) відбувається за твірною від дії дотичних напружень за рахунок розшарування, спостерігається тільки для анізотропних матеріалів.

До третього типу (лінія III) відноситься руйнування шляхом відриву по гвинтовій лінії, яке може мати місце тільки для малопластичних матеріалів і має крихкий характер.

Визначення відносного зсуву під час кручення

Відносним зсувом γ називається відношення довжини дуги повороту кола одного перерізу щодо іншого до відстані між цими перерізами, виражене у відсотках або безрозмірною величиною. Як випливає з рис. 2.49

$tg\gamma \approx \frac{BC}{AC} \approx \frac{tg\Delta\varphi OB}{AC}$. У зв'язку з малістю кутів γ і $\Delta\varphi$ приймається, що $tg\gamma \approx \gamma$,

а $tg\Delta\varphi \cong \Delta\varphi$, при цьому $\Delta\varphi = \varphi_{II} - \varphi_I$, а $OB = \frac{d}{2}$ і $AC = l$.

Таким чином $\gamma = \frac{(\varphi_{II} - \varphi_I)d}{2l} \cdot 100\%$.

Цю формулу використовують для визначення відносного зсуву γ , задаючи значення $\Delta\varphi$. Якщо врахувати, що $\frac{\Delta\varphi}{l} = \theta$ - відносний кут закручування, можна в остаточному вигляді записати $\gamma = \theta \frac{d}{2}$.

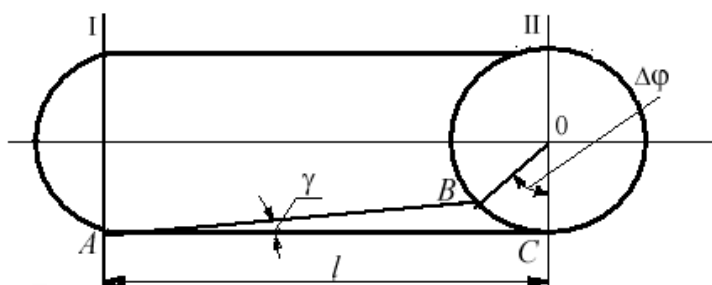


Рис. 2.49 До визначення відносного зсуву γ

Визначення модуля зсуву під час кручення

Модуль зсуву або модуль другого роду (МПа) розроблений і обґрунтований Шарлем Кулоном в 1780-1784 р.р. Це перша характеристика пружності, яка використовувалася для опису зв'язку деформації і напружень. З закону

Гука випливає, що $\tau = G\gamma$; і так як $\tau = \frac{M_{\kappa}}{W_{\rho}}$, де W_{ρ} - полярний момент інерції,

$W_p = \frac{\pi d^3}{16}$, а $\gamma = \frac{(\varphi_{II} - \varphi_I)d}{2l}$, отримуємо $\frac{M_k}{W_p} = G \frac{(\varphi_{II} - \varphi_I)d}{2l}$. З чого випливає, що

$G = \frac{M_k \cdot 2l}{W_p \cdot (\varphi_{II} - \varphi_I)d}$. З урахуванням $I_p = W_p \frac{d}{2}$, в кінцевому випадку вираз для

визначення модуля зсуву має вигляд: $G = \frac{M_k \cdot l}{(\varphi_{II} - \varphi_I) \cdot I_p}$.

Для визначення статичного модуля зсуву використовуються графічний та інструментальний методи. Відповідно до графічного методу модуль визначається з використанням діаграми деформування в координатах $\tau - \gamma$, рис.

2.50 з якої випливає, що $G = \frac{\tau}{\gamma} = \text{tg} \alpha$ для ділянки пружного деформування матеріалу.

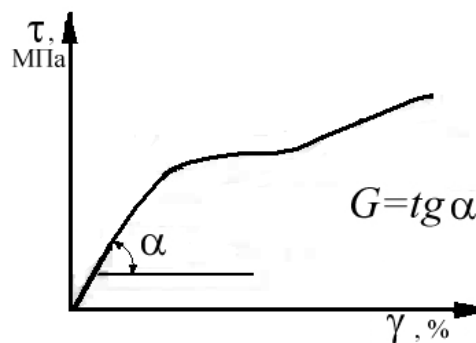


Рис. 2.50 Діаграма деформування за кручення

Інструментальним методом модуль зсуву визначається за допомогою навантажувального пристрою та тензорезисторних перетворювачів кутових переміщень. При реалізації методу зразок встановлюється в захвати пристрою і навантажується до $M_{кр} = 0,1(M_k)_{нц}^{оч}$, після чого на зразок встановлюється оптичний тензометр Мартенса або тензорезисторний перетворювач кутових переміщень на базі виміру l . Після цього навантаження здійснюється до $M_{кр} = (M_k)_{нц}^{оч}$ і проводиться вимірювання кутів закручування φ_I та φ_{II} . Значення моменту M_k і $\Delta\varphi = \varphi_{II} - \varphi_I$ підставляються у формулу та визначається G . Цей метод визначення модуля зсуву називається статичним. Зазначимо, що основним методом визначення є динамічний метод, запропонований Хладні ще в 1787 р.

Статичне значення модуля пружності прийнятне для чорних металів (чавун, вуглецеві сталі), так як для цих металів є характерною при пружному деформуванні наявність лінійної залежності між напруженням та деформацією.

Визначення границі пропорційності τ_{nc}

Границя пропорційності τ_{nc} при крученні визначається двома методами – **інструментальним та графічним**.

Інструментальний метод ґрунтується на визначенні τ_{nc} за допомогою тензометрів методом ступінчастого навантаження (див. розтяг) у координатах $M_k - \Delta\varphi$.

Графічний метод – це метод 50%-дотичної. Для його реалізації необхідно записати машинну діаграму деформування в координатах $M_k - \Delta\varphi$ та за результатами побудови дотичної до діаграми знайти $(M_k)_{nc}$. Порядок визначення $(M_k)_{nc}$ наступний:

- для ординати $M_k = 0,5(M_k)_{nc}^{оч}$, рис. 2.51, проводимо пряму лінію, паралельну осі абсцис, до перетину з віссю ординат (точка M) та діаграмою деформування (точка N). Від точки N на наведеній прямій відкладаємо відрізок NK , довжина якого має становити 0,5 від довжини відрізка MK . Далі через початок координат (точка O) і точку K проводимо промінь OD , паралельно якому проводиться пряма AB таким чином, щоб вона торкалася діаграми деформування (точка C). Ордината точки C відповідає значенню крутного моменту на границі пропорційності $(M_k)_{nc}$, за величиною якого і визначається границя пропорційності τ_{nc} , як $\tau_{nc} = \frac{(M_k)_{nc}}{W_p}$.

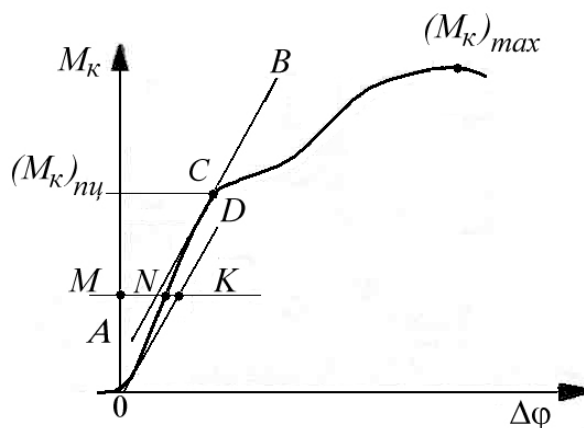


Рис. 2.51 Схема побудови 50% -дотичної AB ($NK = \frac{1}{2}MN$; $AB \parallel OD$)

Визначення границі пружності τ_{np}

$$\tau_{np} = \frac{(M_k)_{np}}{W_p}$$

Допуск на залишкову деформацію на границі пружності τ_{np} відповідно до стандарту ГОСТ 3565-58 може становити 0,015%, 0,0045% та 0,0075%. Його величина визначається двома методами: інструментальним та графічним (див. розтяг).

Визначення границі плинності умовної під час кручення $\tau_{0,3}$

Визначення границі плинності умовної під час кручення $\tau_{0,3} = \frac{(M_{\kappa})_{0,3}}{W_p}$ і, отже, для його визначення необхідно встановити $(M_{\kappa})_{0,3}$. Процедура визначення $(M_{\kappa})_{0,3}$ може виконуватись двома методами – інструментальним та графічним – які аналогічні визначенню $P_{0,2}$ за випробувань на розтяг.

Визначення умовної $\tau_{пц}$ та істинної τ_{κ} границі міцності

Умовна границя міцності $\tau_{пц}$ визначається як $\tau_{пц} = \frac{(M_{\kappa})_{\max}}{W_p}$, де $(M_{\kappa})_{\max}$

– максимальний крутний момент, рис. 2.51, який витримує зразок до руйнування (втрати пластичної стійкості) і який визначається за показаннями силовимірювача при використанні інструментального методу або діаграми деформування - для графічного методу. На рис. 2.52 наведено епюру дотичних напружень (суцільна лінія), яка розрахована з урахуванням пружного деформування матеріалу на поверхні зразка за формулою $\tau = \frac{M_{\kappa}}{J_p} \cdot \rho$. Якщо поверх-

неві волокна зазнають пластичних деформацій (рис. 2.52 – епюра обмежена штриховою лінією), то істинні напруження в цих волокнах будуть нижчими.

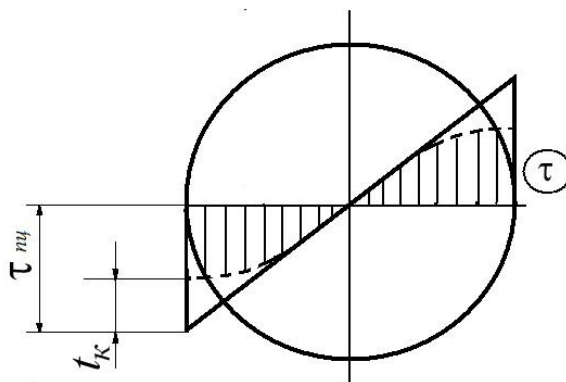


Рис. 2.52 Епюра дотичних напружень при пружному (суцільна лінія) та пружнопластичному деформуванні (штрихова лінія) для $(M_{\kappa})_{\max}$

Стандартом ГОСТ 3565-58 у цьому випадку рекомендується визначати справжню межу міцності як $\tau_k = \frac{4}{nd^3} (3M_{\max} + \Theta \frac{dM}{d\Theta})$, де d – діаметр зразка, $M_{\max} = (M_k)_{\max}$ – найбільший крутний момент, який витримує зразок до руйнування, $\Theta = \frac{(\varphi_{II} - \varphi_I)}{l}$ – відносний кут закручування, що відповідає M_{\max} , і $\frac{dM}{d\Theta}$ визначається як тангенс кута нахилу дотичної $tg\beta = \frac{dM}{d\Theta}$ до діаграми деформування для ординати $(M_k)_{\max}$ рис. 2.53.

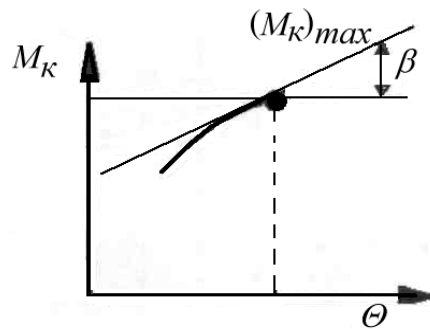


Рис. 2.53 Схема графічного визначення $\frac{dM}{d\Theta}$

Характеристики пластичності при крученні не визначаються, так як звичай зразок втрачає пластичну стійкість до руйнування.

2.4.4 Випробування на ударний згин

Визначення ударної в'язкості за ударного згину

Ударна в'язкість є якісною характеристикою опору матеріалів крихкому руйнуванню. Ця характеристика є обов'язковою в сертифікаті на матеріал.

Ударну в'язкість визначають на двостійкових копрах Шарпі та одностійкових копрах Ізода. На копрах Шарпі випробування проводять в умовах плоского згину поперечного зразка на двох опорах. На копрах Ізода використовуються консольні зразки, для яких реалізується плоский поперечний згин. Методи випробувань на ударний згин регламентовані стандартами ГОСТ 22848-77 та ГОСТ 9454-78 [8, 9].

Призначення ударної в'язкості в якості механічної характеристики:

- ранжувати матеріали щодо їх опору крихкому руйнуванню;
- визначати якість механічної та термомеханічної обробки матеріалу;
- оцінювати ступінь анізотропії матеріалу.

Це основний приймальний метод для металів у металургії та машинобудуванні, у атомній промисловості – для визначення радіаційного зкрихнення.

Ударна в'язкість в залежності від типу концентратора зразків позначається таким чином: KCU , KCV та KCT , де U , V , T – вид концентраторів. Значення ударної в'язкості розраховується як відношення роботи удару до живої площі поперечного перерізу зразка, $KCV = \frac{KV}{F_0} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right)$ тут KV – робота на руйнування зразка, а $F_0 = h \cdot b_0$ – площа нетто-перерізу, рис. 2.54.

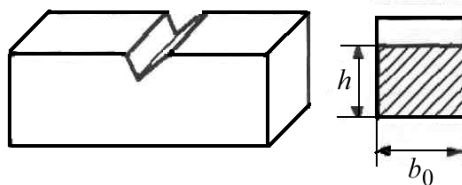


Рис. 2.54. Загальний вигляд зразка для випробувань на ударну в'язкість і його поперечний переріз

Значення ударної в'язкості, наприклад, для зразків з U -подібним концентратором записується у вигляді $KCU^{+200} 7,5/2/10/$. Такий запис означає, що ударна в'язкість визначена на зразках з U концентратором при температурі $+200$ °С на копрі із запасом енергії удару 7,5 Дж з використанням зразків товщиною 10 мм, ширина концентратора у яких становить 2 мм.

Концентратори, що використовуються при випробуваннях

Зразок з U -подібним концентратором (зразок Менаже) використовується для визначення ударної в'язкості KCU для малопластичних металів, рис.2.55а; зразок з V -подібним концентратором (зразок Шарпі) використовується для визначення ударної в'язкості KCV для матеріалів із середньою пластичністю, рис. 2.55б; зразки з T -концентратором (з вирощеною тріщиною), рис. 2.55в дозволяють отримати крихке руйнування практично для будь-яких матеріалів, тому вони є основними для визначення ударної в'язкості сучасних пластичних конструкційних матеріалів.

Випробування на ударну в'язкість вважаються недійсними, якщо не відбулося поділу зразка на 2 частини, або якщо спостерігається велика утяжка крайок.

Температура крихкого переходу

До причин, що викликають зкрихчення матеріалу при випробуваннях на ударний згин, можна віднести такі:

по-перше, у вершині концентратора формується напружений стан всебічного розтягу; відомо, що при такому НС дотичні напруження пригнічені і руйнування має крихкий характер;

по-друге, висока до 7 м/с швидкість навантаження при ударі зразка на маятникових копрах викликає високу швидкість деформування (з урахуванням локалізації деформації в малому об'ємі матеріалу у вершині концентратора).

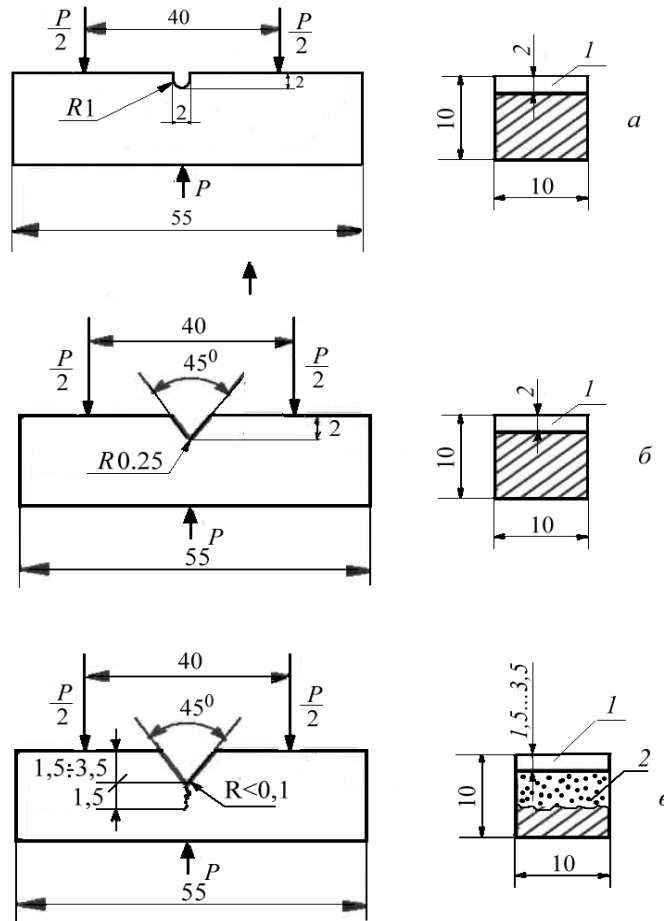


Рис. 2.55 Зразки з U (а), V (б) и T (в) – концентраторами:
1 – концентратор, 2 – втомна тріщина

Поєднання цих двох зриваючих факторів і обумовлює крихке руйнування навіть дуже пластичних матеріалів, таких як низьковуглецеві та нержавіючі сталі, а також хромонікелеві, титанові, алюмінієві та мідні сплави. Практичне застосування випробування на ударну в'язкість знаходять не тільки для вирішення розглянутих вище завдань (ранжування матеріалів, оцінки якості термомеханічної обробки та ступеня анізотропії), але також і для визначення температури крихкого переходу $T_{кр}$ для конструкційних сплавів, що використовуються для виготовлення машин та споруд, експлуатація яких відбувається в умовах знижених та криогенних температур.

Діаграма Кьорбера

Визначення температури крихкого переходу $T_{кр}$ здійснюється з використанням діаграми Кьорбера, яка будується в координатах «ударна в'язкість - температура» і на якій температурі крихкого переходу відповідає розрив експериментальних даних, як це показано штриховою лінією на рис. 2.56 [18].

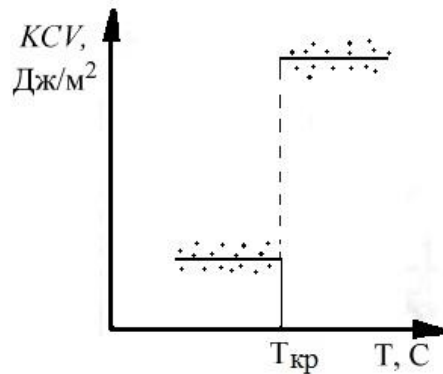


Рис. 2.56 Діаграма Кьорбера

2.4.5 Випробування на повзучість та довготривалу міцність

Випробування на повзучість

Повзучістю називається процес спрямованого пластичного деформування матеріалу за постійної температури в умовах впливу постійних або повільно змінних навантажень.

Випробування на повзучість проводяться у двох режимах навантаження: при постійному навантаженні $P = const$ і при постійних напруженнях $\sigma = const$.

Основним для металів та сплавів є режим сталості навантаження; режим сталості напружень реалізується для полімерних матеріалів та пластмас.

Випробування на повзучість переважно проводяться за високих температур, так як використання характеристик повзучості є обов'язковими при розрахунках на міцність, деформативність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного обладнання, що працює за високих температур [2, 36]. Методи цих випробувань регламентовані стандартом ДСТУ ISO 204:2019 [16]. Відповідно до цього стандарту максимальна база випробувань становить 10000 годин. Хоча для реальних конструкцій за високих температур необхідно мати дані для значно більших баз, оскільки повзучість проявляється за напружень менших $\sigma_{0,2}$, які безпечні у відповідних температурних умовах при активному навантаженні.

У процесі тривалих випробувань криві повзучості (первинні) реєструються у координатах «абсолютне подовження зразка на розрахунковій довжині Δl – час τ »; це первинні криві повзучості, рис. 2.57, які перебудовуються у робочі криві повзучості в координатах «повна відносна деформація ε – час τ », рис. 2.58, або в координатах «пластична деформація ε_n – час τ », рис. 2.59 (істинна крива повзучості).

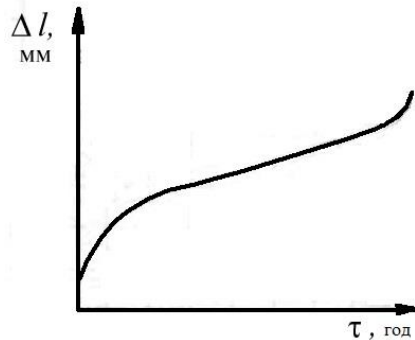


Рис. 2.57 Первинна крива повзучості

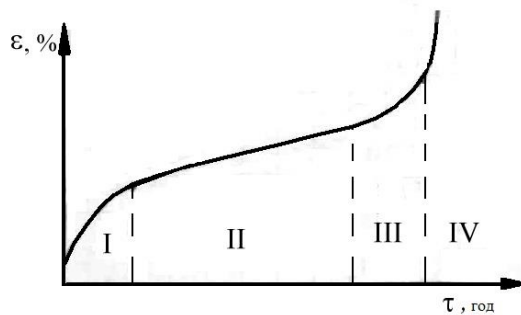


Рис. 2.58 Крива повзучості: ділянка затухаючої неусталеної повзучості (I), ділянка усталеної повзучості (II), ділянка неусталеної повзучості (III), ділянка лавинної повзучості (IV)

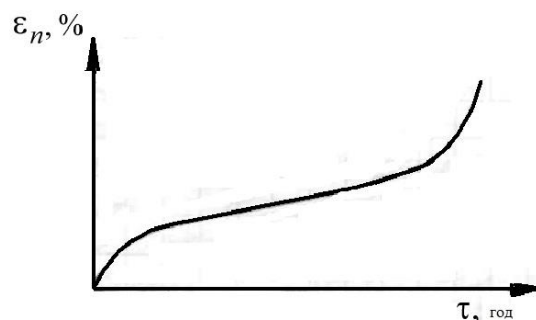


Рис. 2.59 Істинна крива повзучості (виключені пружна і миттєва деформація)

На рис. 2.60 наведено криву повзучості, на прикладі якої проілюстровані складові повної деформації повзучості.

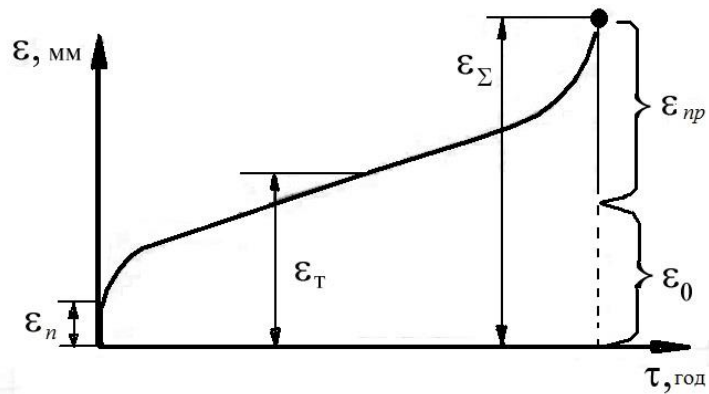


Рис. 2.60 Крива повзучості:

На рис. 2.60 введені такі позначення:

ε_n – початкова деформація, $\varepsilon_n = \varepsilon_{np} + \varepsilon_M$,

ε_{np} – пружна складова,

ε_M – пластична миттєва деформація після прикладення статичного навантаження;

ε_T – поточна деформація;

$\varepsilon_T = \varepsilon_n + \varepsilon = \varepsilon_{np} + \varepsilon_M + \varepsilon$;

ε_Σ – сумарна деформація;

$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_n + \varepsilon_0$, де ε_0 – залишкова деформація після руйнування зразка.

Характеристики, що визначаються під час випробувань на повзучість

Основною характеристикою є границя повзучості. Границею повзучості називається напруження, за якого швидкість повзучості або деформація, накопичена за певний час, не перевищують заданої величини. Відповідно до цього визначення границя повзучості має два позначення $\sigma_{\varepsilon/\tau}^T$ та $\sigma_{\dot{\varepsilon}}^T$, де T – температура, ε – деформація, τ – час, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість повзучості.

В якості характеристики повзучості також використовується мінімальна швидкість повзучості або швидкість повзучості на усталеній ділянці - $V_{\min}(V_{уст})$.

Зразки для випробувань на повзучість

Стандарт ДСТУ ISO 204:2019 [16] рекомендує використовувати для випробувань на повзучість циліндричні та листові зразки.

Циліндричні зразки з мінімальним діаметром $d_{\min} = 5$ мм, з основним діаметром $d_0 = 10$ мм та з початковою розрахунковою довжиною $l_0 = 100, 150, 200$ мм, рис. 2.61.

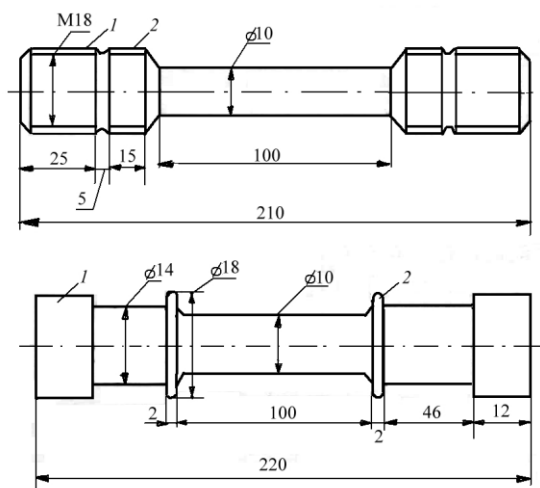


Рис. 2.61 Зразок з різбовими (а) та з гладкими циліндричними головками (б):
 1 – ділянка головки, через яку до зразка прикладається навантаження;
 2 – ділянка, до якої кріпляться подовжувачі системи вимірювання деформації

Порядок проведення випробувань на повзучість

Після встановлення зразка в захватах до нього кріпляться термопари: для зразків довжиною до 100 мм кріпиться дві термопари, довжиною понад 100 мм – три термопари. Якщо при випробуваннях протягом 80% часу до руйнування відбудеться відключення однієї з термопар, випробування вважається недійсним;

- на зразок встановлюється пічка та починається нагрівання зразка; нагрівання до робочої температури має тривати до 8 годин для структурно-стабільних матеріалів;

- здійснюється витримка зразка при заданій температурі протягом 1 години;

- проводиться попереднє навантаження зразка до навантаження $P = 0,1P_{роб}$;

- на подовжувачі, виведені із зони високих температур, встановлюються тензометри та здійснюється повільне збільшення навантаження до робочого рівня ($P_{роб}$), при досягненні якого починається проведення випробувань.

У процесі випробувань на повзучість обов'язковим є контроль температури та вимірювання деформації через кожні 2 години із записом її значень у журнал або комп'ютер.

Визначення характеристик повзучості

За результатами записів будуються сімейства кривих повзучості в координатах $\varepsilon - \tau$ для кількох рівнів температур. Випробування на повзучість за однієї температури проводяться щонайменше за 4-х рівнів напружень, рис.2.62.

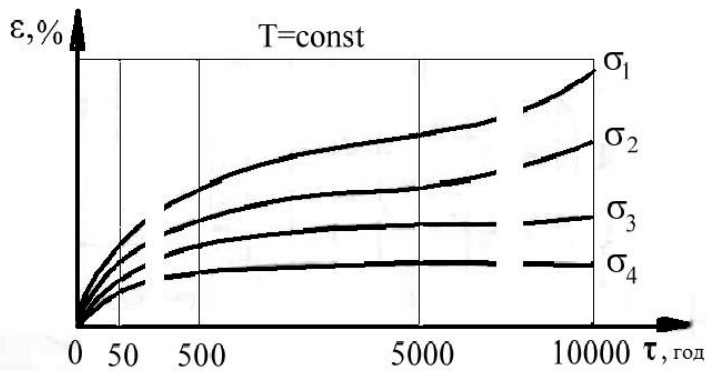
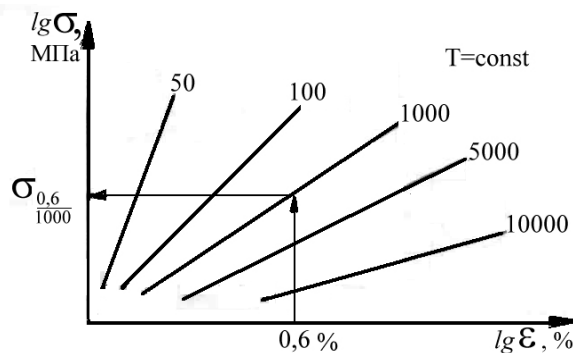


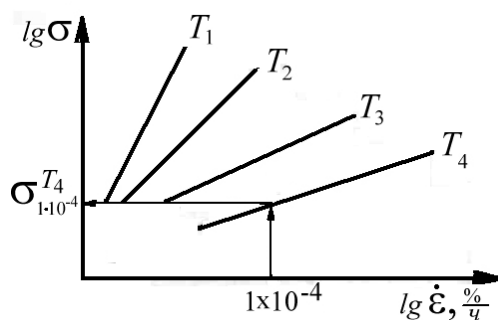
Рис. 2.62 Криві повзучості для напружень $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$

При визначенні границі повзучості ці криві перебудовуються в криві $\lg \sigma - \lg \varepsilon$ за параметром тривалості випробувань на базах 50, 100, 300, 500, 1000, 3000, 5000, 10000 годин (ГОСТ 3248-81), рис. 2.63а, і в криві $\lg \sigma - \lg \dot{\varepsilon}$ за параметром температури, рис. 2.63б.

На рис. 2.63 проілюстровано порядок визначення по цим кривим границі повзучості $\sigma_{\frac{0,6}{1000}}^T$ (границі повзучості для деформації 0,6 % на базі 1000 год), рис. 2.63а, і $\sigma_{1 \times 10^{-4}}^{T_4}$ (границі повзучості для швидкості повзучості $1 \times 10^{-4} \frac{\%}{год}$) при температурі T_4 , рис. 2.63б.



а



б

Рис. 2.63 Граничні криві по параметру тривалості випробувань (а) і температури (б): $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$

Швидкість повзучості на усталеній стадії або мінімальна швидкість повзучості є важливою характеристикою, особливо для повзучості з розвинени-

ми ділянками повзучості, тривалість яких визначає довговічність конструкції. Вона визначається для кривих повзучості згідно з виразом:

$$V_{\min(\text{уст})} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot 100 \%$$

(див. рис. 2.64а) або приймається рівною мінімальній ординаті на кривій, наведеній на рис. 2.64б.

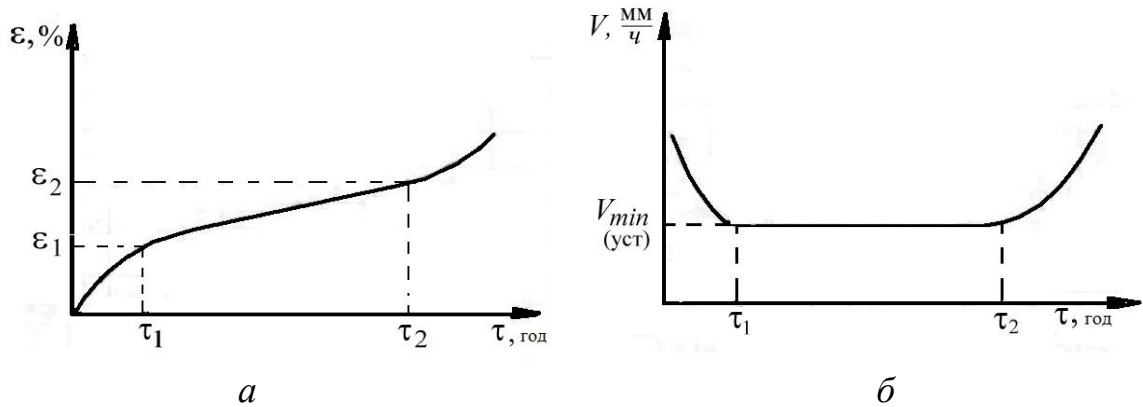


Рис. 2.64 Визначення швидкості мінімальної (усталеної) повзучості по кривим повзучості (а) і швидкостей повзучості (б)

Випробування на тривалу міцність

Тривалою міцністю називається здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при тривалому статичному пасивному навантаженні [2, 36].

Основний режим випробувань на тривалу міцність для металевих конструкційних матеріалів $P = const$. База випробувань на тривалу міцність згідно зі стандартом ГОСТ 10145-81 [15] обмежена 10000 год, але у літературі описані результати безперервних випробувань на тривалу міцність тривалістю понад 200000 год (22 роки).

За результатами випробувань будуються криві тривалої міцності в координатах «напруження σ - час до руйнування τ_p », рис. 2.65а. Як правило, на кривих тривалої міцності спостерігаються переломи, див рис. 2.65б, т. А і В, які відповідають зміні механізмів руйнування матеріалу.

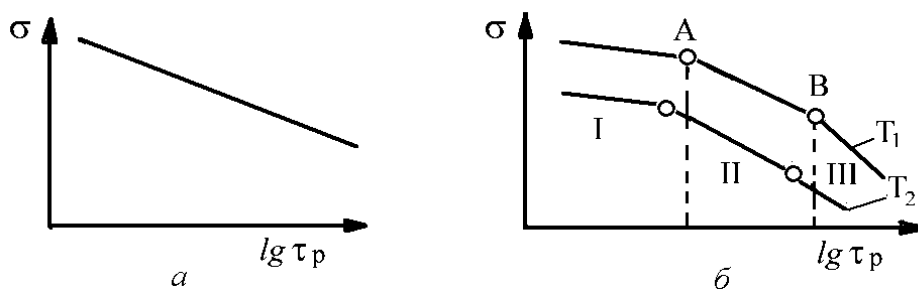


Рис. 2.65 Криві тривалої міцності

Положення переломів залежить від структурної стабільності, властивостей матеріалу та від температури випробувань. З підвищенням температури вони зміщуються у бік менших довговічностей. Чисельні результати дослідження тривалої міцності у широкому діапазоні довговічностей та температур показують, що переломи на кривих, рис. 2.65б, розмежовують ділянки з різним характером руйнування. Переважно ділянка I відповідає міжзеренному руйнуванню, ділянка II – внутрішньозеренному, а ділянка III – руйнуванню, що ініціюється пороутворенням.

Під час випробувань на тривалу міцність визначають границі тривалої міцності $\sigma_{\tau_p}^T$ – напруження, у яких руйнування матеріалу настає за заданої температури T через певний час τ_p .

Для визначення границі тривалої міцності використовується графічний спосіб шляхом перебудови первинних кривих тривалої міцності (рис. 2.66а) у граничні криві, що будуються в координатах «напруження – температура» за параметрами довговічності, які відповідають базам випробувань, регламентованим стандартом.

При випробуваннях на тривалу міцність стандарт ГОСТ 10145-81 [15] рекомендує приймати такі бази випробувань: 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000 та 10000 годин. На первинних кривих (рис. 2.66а) по осі абсцис відкладають відрізки, відповідні базам випробувань, з яких проводять нормалі до перетину з кривими тривалої міцності (на рис. 2.66а схематично показані такі нормалі для баз 50, 500, 5000 і 10000 год). Використовуючи значення координат перетину, будують граничні криві (рис. 2.66б), які дозволяють визначати границі тривалої міцності.

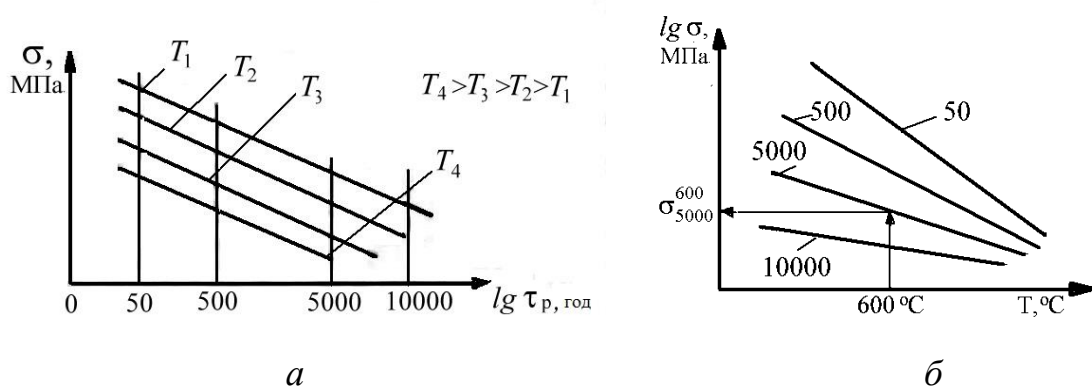


Рис. 2.66 Первинні (а) і граничні (б) криві тривалої міцності

На рис. 2.66б проілюстровано визначення границі тривалої міцності для дослідженого сплаву за температури 600 °С на базі 5000 годин, тобто визначається напруження, нижче якого за температури 600 °С умови експлуатації конструкції будуть безпечними за довговічності до 5000 годин.

При випробуваннях на тривалу міцність також визначаються характеристики пластичності: відносне видовження після розриву $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$ і відносне звуження після розриву $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$, де l_0 і F_0 початкова розрахункова довжина і площа поперечного перерізу зразка, l_k і F_k ті ж величини після поділу зразка на дві частини.

Зразки для випробувань на тривалу міцність

Основними при випробуваннях на тривалу міцність стандарт рекомендує використовувати циліндричні зразки:

$$d_0 = 5 \text{ мм}, \quad l_0 = 25 \text{ і } 50 \text{ мм};$$

$$d_0 = 7 \text{ мм}, \quad l_0 = 70 \text{ мм};$$

$$d_0 = 10 \text{ мм}, \quad l_0 = 100 \text{ мм};$$

$$(d_{0\text{min}} = 3 \text{ мм}).$$

Для плоских зразків так само, як і при випробуваннях на короткочасну міцність, потрібно дотримувати співвідношення між l_0 і F_0 : $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ (при цьому $b_{\text{min}} = 0,5 \text{ мм}$, $\frac{b}{h} \leq 4$).

Форма та розміри головок зразків не регламентуються, а залежать від способу кріплення зразка у захватах випробувального пристрою та властивостей матеріалу і повинні забезпечувати жорстке центрування зразка, запобігати зім'яттю та деформуванню головок та перехідних ділянок та забезпечувати руйнування зразка на робочій ділянці.

Порядок проведення випробувань на тривалу міцність

При випробуваннях на тривалу міцність вимірювання деформації не є обов'язковим, а черговість процедур при підготовці зразка до випробувань є такою:

- зразок встановлюється у захватах випробувальної машини, до нього кріпляться термопари, після чого він розміщується в нагрівальному пристрої – електричній печі, що забезпечує задану температуру;
- далі проводиться його нагрівання до робочої температури протягом 8 годин;
- після нагрівання здійснюється витримка зразка при робочій температурі протягом часу не менше 1 години;
- після витримки за робочої температури та стабілізації температурного поля зразок навантажується до навантаження $P = 0,1P_{\text{роб}}$ (тут $P_{\text{роб}}$ – робоче

розрахункове навантаження), до подовжувачів системи вимірювання деформації, винесених із зони високих температур, кріпляться два індикатори годинникового типу та перевіряються термопари (встановлюється 2 термопари якщо $l \leq 100$ мм і за $l_0 > 100$ мм - три термопари);

– далі зразок плавно навантажується до робочого навантаження та починається відлік показань.

У процесі випробувань на тривалу міцність необхідно обов'язково кожні 2 години записувати (знімати) показання температури.

Випробуванням на тривалу міцність піддаються жароміцні сталі та жароміцні сплави, що використовуються для виготовлення високотемпературного устаткування теплових електростанцій, настановний ресурс яких розрахований на 30 років і більше.

2.4.6 Випробування на втому

Випробування на втому (витривалість)

Втомою називається явище руйнування матеріалів за дії повторно-змінних навантажень, яке відбувається в результаті безперервного накопичення розсіяних пошкоджень, утворення мікротріщин, їх об'єднання та трансформації в макротріщини, розвиток яких призводить до поділу деталі на дві частини [41. 50].

Отже, втома є стадійним процесом, що стартує з накопичення розсіяних пошкоджень. За час напрацювання, що становить у більшості випадків до 5% довговічності деталі, утворюються мікротріщини, розвиток яких переходить у стадію утворення макротріщин, що завершується остаточним руйнуванням.

Руйнування від втоми відбувається за напружень значно менших границі плинності, тобто, в інтервалі між границями пропорційності та пружності.

Витривалістю називається здатність матеріалу чинити опір втомі.

Методи випробувань на втому (витривалість) регламентовано стандартами: ГОСТ 23.026-78 «Метали. Методи випробувань на багатоциклову та малоциклову втому» та ГОСТ 25.502-79 «Методи механічних випробувань металів. Методи випробувань на втому» [10, 11].

Довговічність за циклічного навантаження залежить від великої кількості факторів, які можна поєднати в три групи:

- експлуатаційні фактори,
- технологічні фактори,
- конструкційні фактори.

Відомо, що кореляції між границею втоми (витривалості) і границею міцності не існує, так як на ці характеристики міцності зазначені фактори впливають по-різному.

До групи експлуатаційних факторів відносяться:

- форма та тривалість циклу напружень;
- коефіцієнт асиметрії циклу;
- частота навантаження;
- режим навантаження (м'який, жорсткий);
- характер навантаження (регулярне, блочне (програмне) та випадкове навантаження);
- швидкість деформування в межах циклу на півциклі розтягу;
- температура випробувань;
- середовище різного ступеня агресивності, що викликає корозійну втому.

До технологічних факторів відносяться:

- стан поверхні, пов'язаний з якістю обробки матеріалу;
- глибина наклепаного шару (чим більша глибина наклепу, тим більша довговічність);
- спосіб виготовлення деталі (лиття, прокатка, кування, штампування).

До основних конструкційних факторів можна віднести:

- концентрацію напружень (галтелі, виточки, різьблення, шпонкові пази тощо);
- масштабний фактор, пов'язаний із впливом розмірів деталі на довговічність (що більший розмір деталі, тим менша за інших рівних умов її циклічна міцність та довговічність);
- рівень залишкових напружень.

При випробуваннях на втому (витривалість) визначається границя витривалості (втоми) σ_r , де r - коефіцієнт асиметрії циклу: σ_{-1} при $r = -1$ для симетричного циклу; σ_0 за $r = 0$ - пульсуючий розтяг; σ_∞ визначається за пульсуючому стиску, для якого $r = \pm\infty$.

Границею витривалості (втоми) називається максимальне напруження, яке матеріал витримує, не руйнуючись, за циклічного навантаження при нескінченно великому числі циклів. Така границя витривалості називається фізичною. Фізична границя витривалості характерна лише для чорних металів; для решти металів (алюмінієві, титанові, мідні, тугоплавкі, хромонікелеві та ін. сплави, високолеговані і нержавіючі сталі) фізичної границі витривалості не існує.

Тип навантаження

М'який тип – навантаження, контроль якого в експерименті здійснюється за навантаженнями (сили, момент) або напруженнями.

Жорсткий тип – навантаження, контроль якого в експерименті здійснюється за переміщеннями або деформаціями.

Характеристики циклу навантаження за випробувань на втому

Основним циклом навантаження при повторно-змінному навантаженні є гармонічний. Такий цикл наведено на рис. 2.67:

- T – період циклу;
- σ_m і ε_m – середні значення напружень та деформацій;
- σ_a і ε_a – амплітудні значення;
- $\sigma_{\max} (\varepsilon_{\max})$ – максимальні значення;
- $\sigma_{\min} (\varepsilon_{\min})$ – мінімальні значення
- r – асиметрія циклу $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \end{aligned} \right\} \text{— для м'якого режиму,}$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_m &= \frac{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}}{2} \\ \varepsilon_a &= \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{2} \end{aligned} \right\} \text{— для жорсткого режиму.}$$

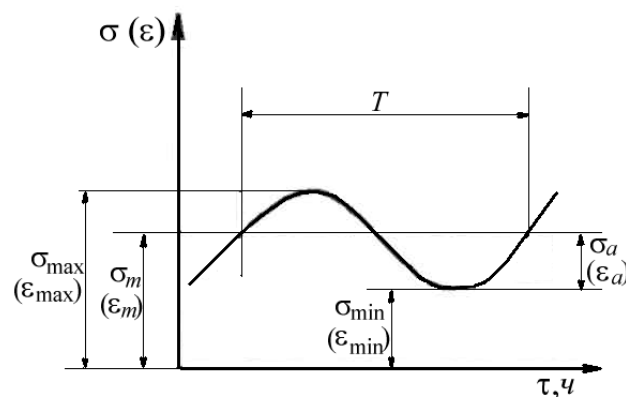


Рис. 2.67 Гармонічний цикл навантаження

Для порівняння результатів випробувань на втому різних зразків при побудові кривої втоми (витривалості) необхідно дотримуватися однієї з двох умов подібності випробувань:

- для якої $r = const$,
- для якої $\sigma_m (\varepsilon_m) = const$,

тобто криву втоми можна отримати в порівняльних величинах, якщо для всіх випробуваних зразків залишається постійним коефіцієнт асиметрії циклу або постійною величина середніх напружень (деформацій) циклу.

Характер навантаження

За характером навантаження поділяють на: регулярне, блочне та випадкове.

Регулярне навантаження – є таким, при якому в процесі всього життя конструкції всі цикли ідентичні (однакові T , r та однакова форма циклу).

В основному випробування на витривалість у лабораторних умовах проводяться за регулярного циклу навантаження.

Блочне навантаження – є таким, у якому циклічні напруження змінюються східчасто в межах одного блоку, а блоки постійно повторюються. У межах одного блоку береться не більше 5 сходів/етапів зміни напружень, рис. 2.68.

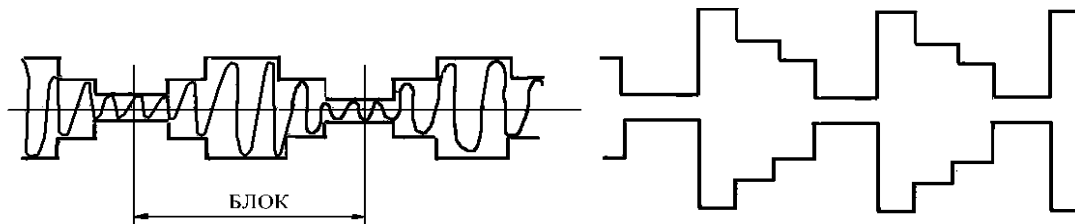


Рис. 2.68а Схематизація блочного навантаження

Випадкове навантаження. За випадкового навантаження амплітуда навантаження (деформації) змінюється випадковим чином залежно від закону розподілу або відповідає реальному характеру навантаження конструкції в процесі експлуатації.

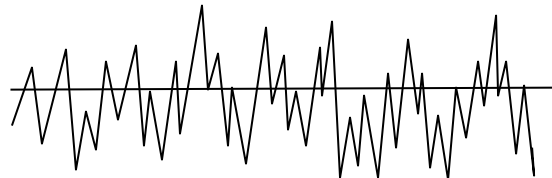


Рис. 2.68б Випадкове циклічне навантаження

Циклічні властивості матеріалу

Втома (витривалість) залежить від циклічних властивостей матеріалу. Матеріали відповідно до цього параметра поділяються на три групи:

- **циклічно-зміцнювані** матеріали;
- **циклічно-стабільні** (циклічно ідеальні) матеріали;
- **циклічно-знеміцнювані** матеріали.

Циклічно-зміцнювані матеріали. До них відносяться конструкційні сталі, алюмінієві сплави, мідні сплави, Cr-Ni сплави.

Циклічно-знеміцнювані матеріали – це деякі теплостійкі сталі, титанові сплави, а також жароміцні сталі та сплави при підвищених та високих температурах.

На рис. 2.69 для умов м'якого (а) і жорсткого (б) режимів навантаження схематично проілюстровані зміни ширини петлі гістерезису (а) та амплітуди напружень (б) для циклічно зміцнюваних (крива 1), знеміцнюваних (крива 3) та стабільних (крива 2) матеріалів.

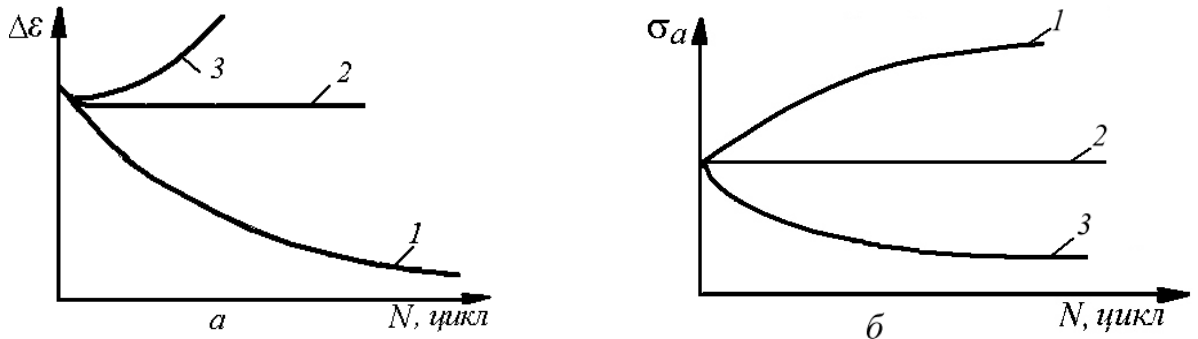


Рис. 2.69 Характер зміни деформацій (а) та напружень (б) для металічних матеріалів з контрастними циклічними властивостями

Вплив асиметрії циклу

Коефіцієнт асиметрії циклу у всьому інтервалі реалізованих циклів навантаження змінюється від $+1$ до -1 з переходом через $\pm \infty$. Основний цикл при випробуваннях на втому – симетричний, для якого $r = -1$, а довговічність найменша у порівнянні з іншими циклами. На рис. 2.70 показані криві втоми для умов жорсткого навантаження для циклів з різною асиметрією. Як бачимо, в інтервалі зміни коефіцієнта асиметрії від -1 (симетричний цикл) до 0 (пульсуючий цикл) довговічність різко збільшується, тобто симетричний цикл навантаження є найнебезпечнішим для матеріалу конструкцій і тому вважається основним для випробувань: значення σ_{-1} є довідковими та наводяться в таблицях із зазначенням бази випробувань, якщо для відповідних матеріалів не існує фізичної границі витривалості (втоми).

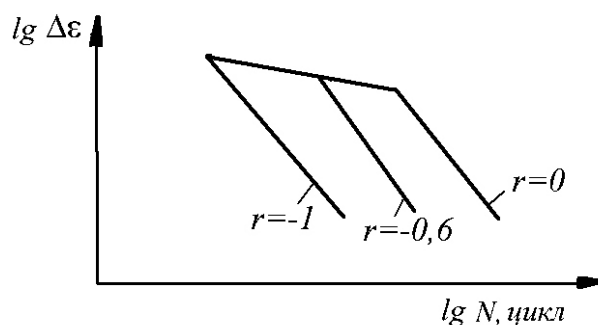


Рис. 2.70 Криві втоми для симетричного ($r = -1$), асиметричного знакозмінного ($r = -0,6$) і пульсуючого ($r = 0$) циклів

На рис. 2.71 заштрихована основна область, що відповідає навантаженню матеріалу конструкції, для якої проводяться випробування на втому та виконується оцінка (розрахунок) довговічності та циклічної міцності.

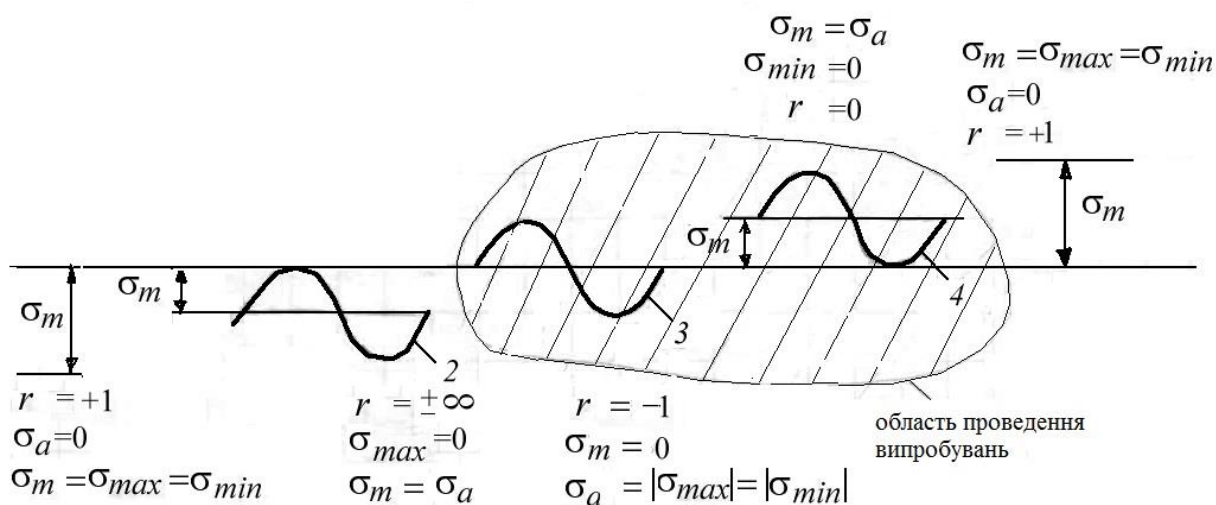


Рис. 2.71 Зміна асиметрії і параметрів циклів навантаження у всьому діапазоні їх значень від статичного стиску ($r = +1$) до статичного розтягу ($r = +1$) з переходом через пульсуючий стиск ($r = \pm\infty$); симетричний цикл ($r = -1$); пульсуючий розтяг ($r = 0$), де статичний розтяг відповідає випробуванням на короткочасну і тривалу міцність і повзучість

Графічно залежність коефіцієнта асиметрії циклу від типу циклу навантаження проілюстрована на рис. 2.72, де:

- c* - статичний стиск,
- п.с.* - пульсуючий стиск,
- с.ц.* - симетричний цикл,
- п.ц.* - пульсуючий розтяг,
- p* - статичний розтяг.

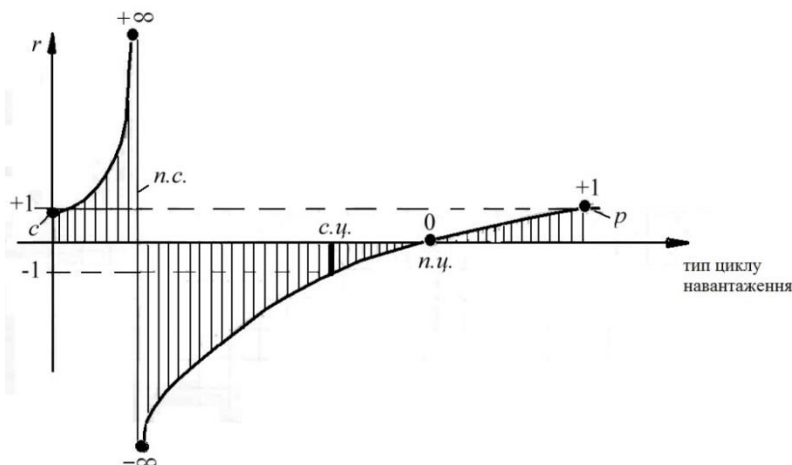


Рис. 2.72 Узагальнена крива зміни коефіцієнта асиметрії циклу у всьому діапазоні його значень

Повна крива втоми

Відповідно до стандартів ГОСТ 23.026-78 [10] та ГОСТ 25.502-79 [11] для матеріалів, що мають фізичну межу витривалості, випробування проводяться на базі 10^6 циклів. Для матеріалів, що не мають фізичної границі витривалості, – на базі 10^8 циклів.

Під час випробувань частота навантаження повинна встановлюватися такою, щоб температура розігріву для чорних сплавів не перевищувала $100\text{ }^\circ\text{C}$, а кольорових $50\text{ }^\circ\text{C}$. Стандарти рекомендують для побудови кривої втоми використовувати щонайменше 15 зразків. Якщо необхідно отримати криву втоми з визначенням імовірнісних характеристик (довірчі інтервали, середнє квадратичне відхилення, розподіл ймовірностей тощо) рекомендується випробувувати зразки мінімум на 6 рівнях по 10 зразків на один рівень для області багатоциклової втоми.

Криві втоми будують для окремих областей, незалежно отримують криві малоциклової, криві багатоциклової втоми та криві для високочастотної області навантаження, рис. 2.73.

Повна крива загалом характеризується наявністю шести типових ділянок, які по-різному можуть проявлятися для різних областей втоми залежно від асиметрії циклу та режиму навантаження. Лівою межею повної кривої втоми є т. А, рис. 2.73, яка відповідає границі міцності та числу циклів 0,5, тобто випробуванню на короткочасну міцність та руйнуванню зразка при однократному навантаженні.

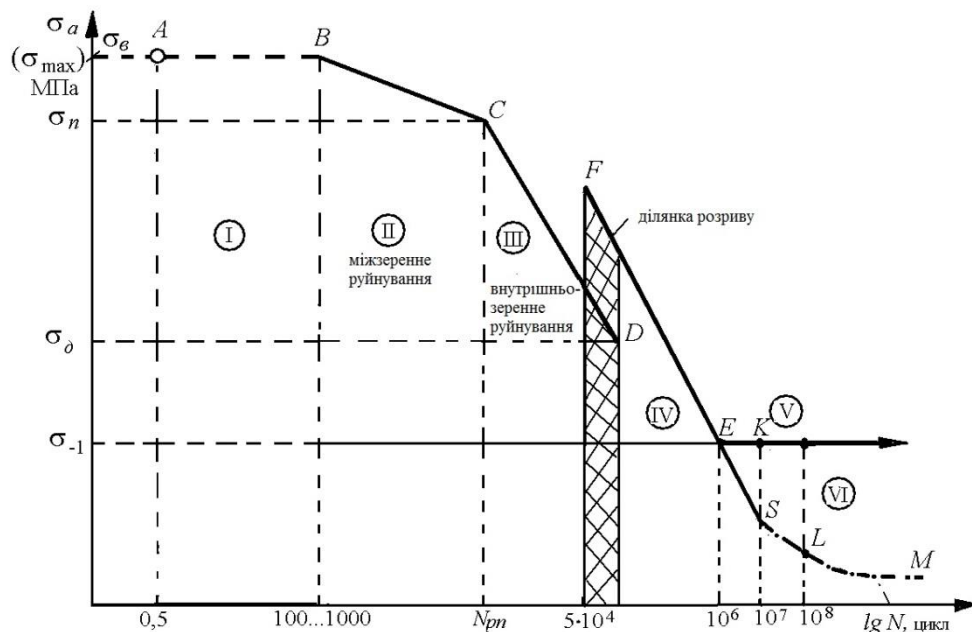


Рис. 2.73 Повна крива втоми

I ділянка, інтервал *A-B* характеризує I ділянку кривої втоми, яка класифікується як ділянка неруйнування: відомо, що якщо руйнування зразка не відбулося при першому циклі навантаження, то воно відбудеться не раніше, ніж через 100...1000 і більше циклів залежно від особливостей циклічного навантаження.

II ділянка *B-C* – це ділянка циклічної повзучості; вона відповідає руйнуванню від циклічної повзучості шляхом вичерпання резервів пластичності матеріалу та реалізації такого характеру руйнування, що має місце при випробуваннях на короточасну міцність та пов'язаного з утворенням шийки та руйнуванням у шийці; тому його називають ще ділянкою квазістатичного руйнування. У цьому випадку постійно йде одностороннє накопичення пластичної деформації, рис. 2.74, яке найбільш рельєфно проявляється при пульсуючому (і будь-якому асиметричному) навантаженні для всіх матеріалів; при симетричному навантаженні квазістатичне руйнування не є характерним і може мати місце тільки для циклічно анізотропних матеріалів.

У загальному випадку з певним наближенням можна прийняти, що накопичена до руйнування при циклічній повзучості пластична деформація $\varepsilon_{\Sigma p}$ близька за величиною до залишкового видовження δ , яке визначається як основна характеристика пластичності матеріалу при випробуваннях на короточасну міцність.

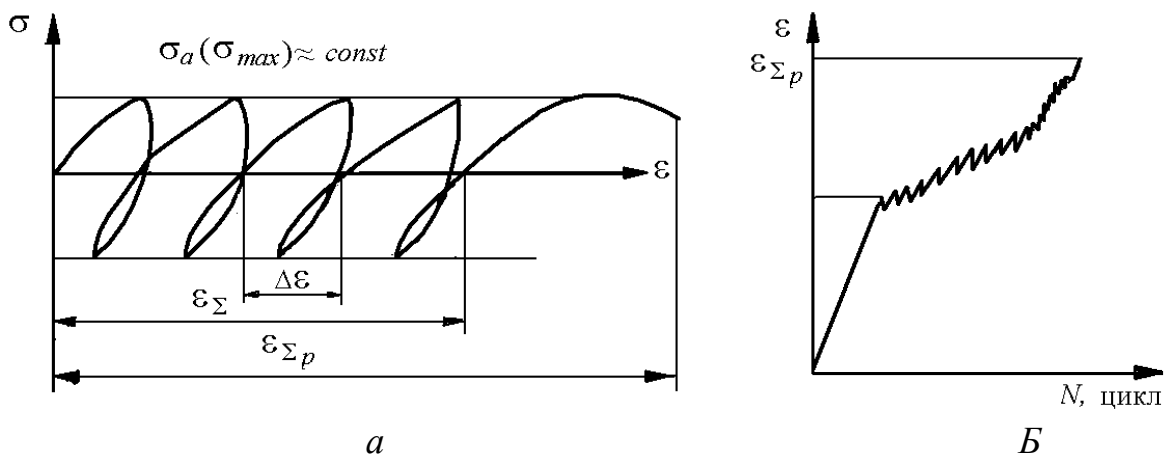


Рис. 2.74 Діаграма циклічного деформування (а) та крива циклічної повзучості (б) за пульсуючого навантаження, тут $\Delta \varepsilon$ і ε_{Σ} накопичена за один і N циклів деформація; $\varepsilon_{\Sigma p}$ – деформація, накопичена до руйнування.

III ділянка – це ділянка *C-D* власне малоциклової втоми або ділянка малоциклового втомного руйнування. На цій ділянці руйнування відбувається за механізмом втоми в результаті утворення та розвитку макротріщини та поділу зразка на дві частини, що відбувається в результаті реалізації у мате-

ріалі великих пружнопластичних деформацій. Межами ділянки III є σ_n – напруження переходу, які є функцією границі плинності матеріалу $\sigma_{0,2}$, та динамічної границі плинності σ_0 .

Перелом у точці *C*, рис. 2.73 відповідає зміні механізму руйнування від міжзеренного до внутрішньозеренного.

Область ABCD, для якої характерна наявність ділянок I, II, III, відповідає області малоциклової втоми, її нижньою межею за кількістю циклів навантаження відповідно до ГОСТ 23.026-78 [10] орієнтовно приймається $N_p = 5 \times 10^4$ циклів, хоча реально за певних умов навантаження вона може досягати 2×10^5 циклів.

При переході в область більшого числа циклів на повній кривій втоми, як правило, відбувається розрив, величина інтервалу якого за кількістю циклів і напружень залежить від циклічних властивостей матеріалу (циклічно зміцнюваних, знеміцнюваних або стабільних), режиму і характеру циклічного навантаження. Цей розрив має місце між областю малоциклової та багатоциклової втоми, і прийнято вважати, що його прояв пов'язаний із зміною механізму деформування при переході з однієї області втоми до іншої: від макропластичного до непружного. Розрив на рис. 2.73 показаний заштрихованою областю.

Область IV – FE SL – ділянка руйнування від багатоциклової втоми для кольорових металів та сплавів, що не мають фізичної границі витривалості, з нижньою межею довговічності 10^8 циклів; *FE* відповідна ділянка руйнування для чорних металів з фізичною межею витривалості σ_{-1} , *EK* – ділянка неруйнування для чорних металів із рекомендованою стандартом нижньою межею 10^7 циклів.

Слід зазначити, що руйнування в результаті непружного деформування матеріалу, так само як і за малоциклової втоми, відбувається шляхом утворення та розвитку макротріщин та поділу зразка на дві частини (пластичні деформації відсутні).

Фізична границя витривалості σ_{-1} може бути визначена як циклічна границя пропорційності [50].

За довговічності, більшої 10^7 , на повній кривій втоми реалізується ділянка *V*, це ділянка *LM* – високочастотної втоми, для якої характерні частоти навантаження 1-100 кГц та діапазон досліджених довговічностей до 10^{10} циклів. При побудові повної кривої втоми необхідно дотримуватися умов подібності $T = const$, $\sigma_m = const$ і або $r = const$.

Узагальнені діаграми втоми (діаграми граничних напружень)

Ці діаграми дозволяють уявити весь масив даних, визначених при випробуваннях на втому, в різних умовах за допомогою одного графіка, який можна отримати за короткий час завдяки використанню прискорених методів випробувань[50].

До таких діаграм відносяться:

- **діаграма граничних напружень** (діаграма Сміта), що будується в координатах $\sigma_{\max}(\sigma_{\min}) - \sigma_m$;
- **діаграма граничних амплітуд** (діаграма Хейя), що будується в координатах $\sigma_a - \sigma_m$;
- **діаграма граничного напруження** (діаграма Мура-Коммерса-Яспера), що будується в координатах $\sigma_{\max} - r_\sigma$.

Найбільш простою для представлення результатів випробувань на втому за дотримання умов подібності ($\sigma_m = const$ или $r_\sigma = const$) є вихідна крива або крива Веллера, вперше отримана цим німецьким ученим в 1853 р. Така крива, рис. 2.75 є базовою для побудови узагальнених діаграм втоми

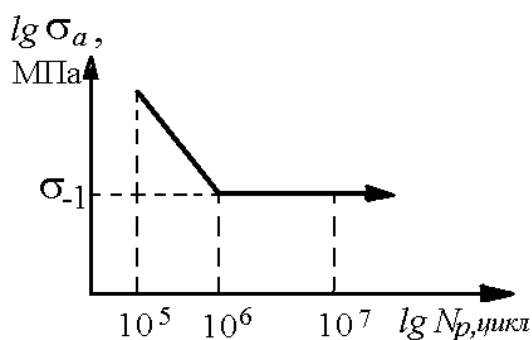


Рис. 2.75 Крива втоми для чорних металів, отримана за симетричного навантаження $r_\sigma = -1$

На рис. 2.76 представлена діаграма граничних напружень або діаграма Сміта. При її побудові використовують результати випробувань на короткочасну міцність (σ_ϵ і σ_T) та втому для отримання кривих Веллера при симетричному навантаженні (σ_{-1} , $r_\sigma = -1$) та декількох асиметричних циклах ($r_\sigma \neq -1$) для отримання проміжних точок.

Для пластичних матеріалів діаграма обмежена точками $ABCD$, при цьому відрізок BC відповідає границі плинності, точка F – границі міцності, а точки A та D – границі витривалості при симетричному циклі.

Схематизовану діаграму Сміта можна побудувати за результатами обмежених за обсягом результатів випробувань, які регламентуються нормативними документами, для крихких та пластичних матеріалів.

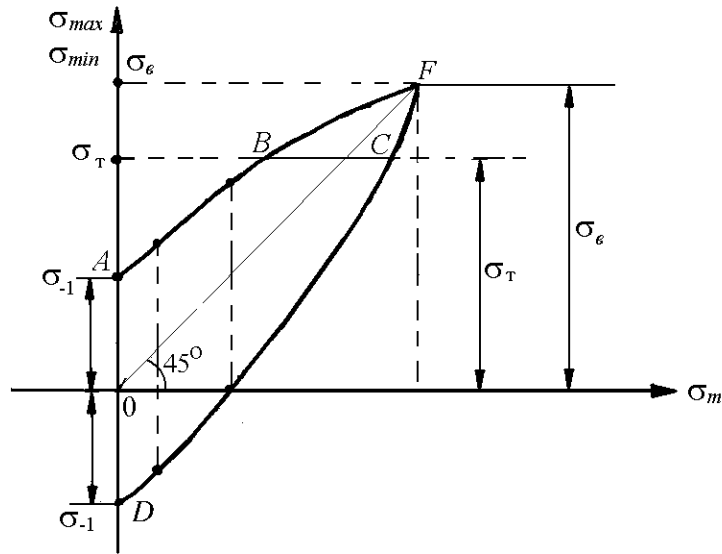


Рис. 2.76 Діаграма Сміта

Прискорена побудова діаграми Сміта для крихких матеріалів

При побудові діаграми Сміта для крихких матеріалів проводиться тільки два види випробувань: на короткочасну міцність для визначення границі міцності σ_ϵ та втому при симетричному циклі навантаження для отримання границі витривалості σ_{-1} . За цими значеннями будується схематизована діаграма Сміта, як показано на рис. 2.77.

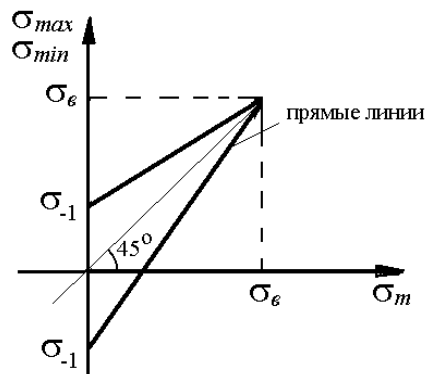


Рис. 2.77 Побудова діаграми Сміта для крихких матеріалів

Для пластичних матеріалів схематизована діаграма Сміта, рис. 2.78 також будується за результатами випробувань на короткочасну міцність з визначенням границі міцності σ_ϵ і границі плинності $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ та на втому за симетричного циклу навантаження з визначенням σ_{-1} .

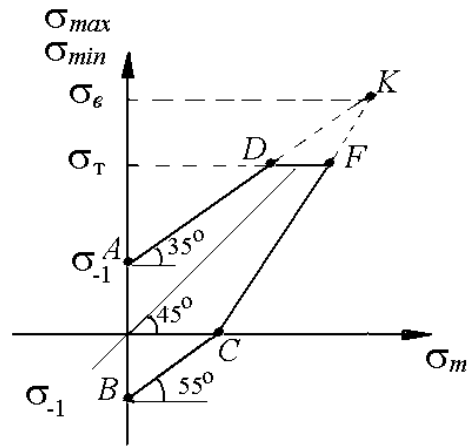


Рис. 2.78 Побудова діаграми Сміта для пластичних матеріалів

При цьому відрізок AK проводиться під кутом 35° до осі абсцис до перетину з горизонталлю, що відповідає σ_T , і отримуємо відрізок AD ; відрізок BC проводиться під кутом 55° до перетину з віссю абсцис, далі точку C з'єднуємо з точкою K до перетину з ординатою, що відповідає границі плинності в точці F . Ламана $ADFCB$ представляє схематизовану діаграму Сміта.

Діаграму Хей називають діаграмою граничних амплітуд, рис. 2.79. По осі ординат відкладається значення амплітуди напружень – σ_a , а по осі абсцис – середнє напруження циклу σ_m . Для побудови повної діаграми Хей необхідно провести випробування на короточасну міцність для визначення σ_ϵ та випробування на втому при симетричному циклі ($r_\sigma = -1$) для визначення σ_{-1} та для кількох асиметричних циклів для отримання проміжних точок на кривій, рис. 2.79.

За результатами таких випробувань будується повна діаграма Хей. Схематизовану діаграму можна отримати за результатами випробувань на короточасну міцність (σ_ϵ) та втому при симетричному циклі навантаження (σ_{-1}), рис. 2.79 з'єднавши координату σ_{-1} з координатою σ_ϵ прямим відрізком AB .

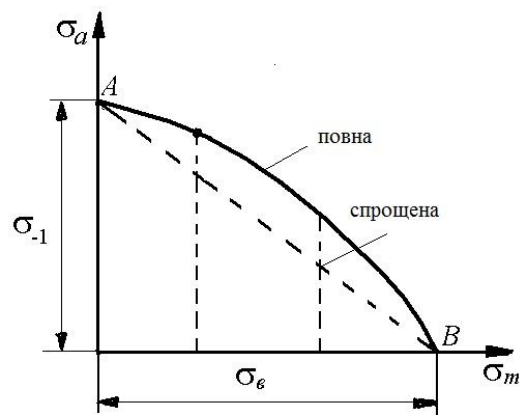


Рис. 2.79 Діаграма Хей

Діаграма Мура-Коммерса-Яспера - це діаграма граничних напружень, рис. 2.80, яка дозволяє оцінити значення граничних напружень залежно від коефіцієнта асиметрії циклу r_σ . Для її отримання необхідно провести: випробування при симетричному циклі та отримати значення σ_{-1} , випробування при пульсуючому навантаженні ($r=0$) для визначення σ_0 та випробування на короткочасну міцність для визначення меж міцності та плинності $\sigma_\epsilon, \sigma_T (\sigma_{0,2})$. Для пластичних матеріалів ця діаграма обмежена кривою ABC , для крихких – ABD .

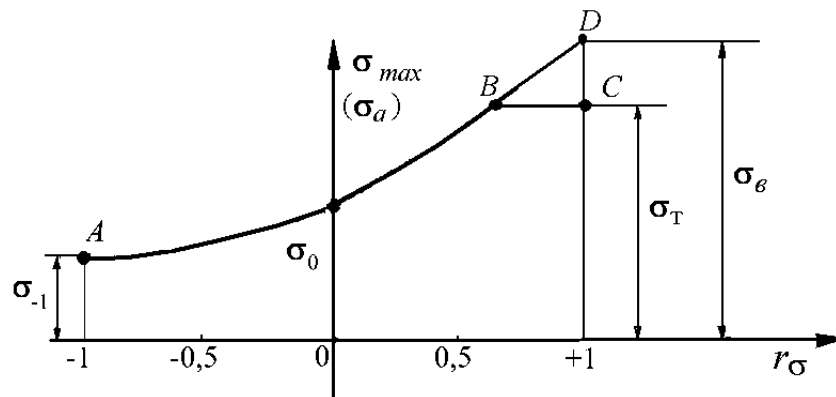


Рис. 2.80 Діаграма Мура-Коммерса-Яспера

Зразки для випробувань на втому

Для випробувань на втому стандарти рекомендують використовувати кілька типів зразків.

До першого типу належать корсетні зразки, рис. 2.81.

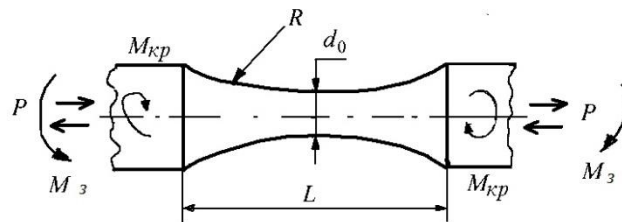


Рис. 2.81 Корсетний зразок

Вони застосовуються при випробуваннях на розтяг-стиснення, при знакозмінному крученні та знакозмінному згині. Основне використання вони знаходять у випробуваннях на згин для області багатоциклової втоми і на розтяг-стиск в області малоциклової втоми. Мінімальний діаметр таких зразків $d_{0_{\min}}$ становить 5 мм, а радіус R дорівнює п'яти мінімальним діаметрам ($R = 5d_{0_{\min}}$).

Другий тип – це циліндричні зразки, які використовуються для умов розтягу-стиску, знакозмінного кручення та згину. Їх мінімальний діаметр d_0 також становить 5 мм, а робоча довжина $L = 5d_0$ і $R = d_0$ рис. 2.82. Основне застосування вони знаходять при випробуванні на розтяг-стиск та знакозмінне кручення в умовах багаточислової втоми

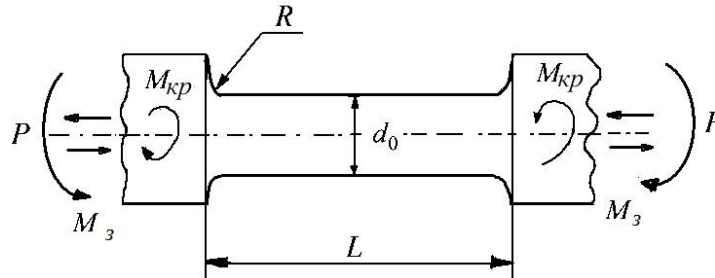


Рис. 2.82 Циліндричний зразок

Третій тип представляють листові корсетні зразки із мінімальною товщиною 0,5 мм, рис. 2.83. Вони використовуються для випробувань на знакозмінний згин та осьовий пульсуючий розтяг; але основним є перший вид випробувань - на знакозмінний згин.

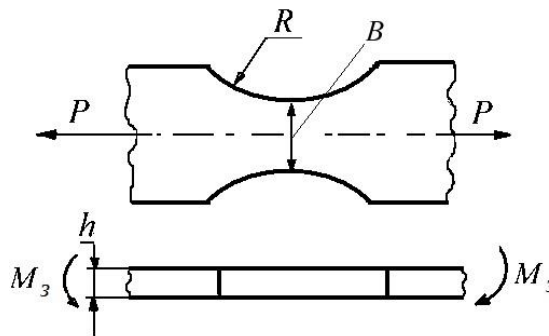


Рис. 2.83 Листовий корсетний зразок

Четвертий тип – це листові зразки із прямокутною робочою ділянкою, рис. 2.84, мінімальна товщина яких становить 0,5 мм. Основні випробування цих зразків – це випробування на пульсуючий розтяг, для випробувань на знакозмінний згин краще використовувати корсетні зразки.

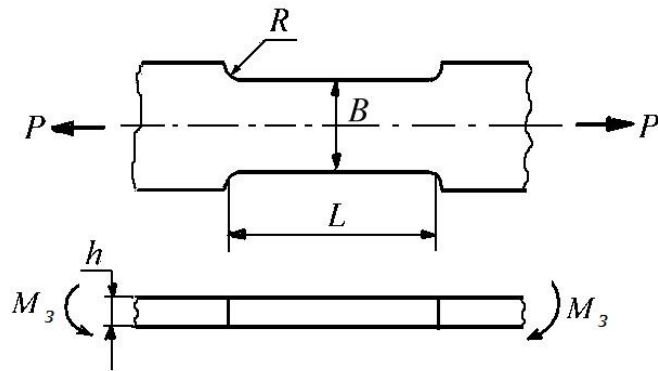


Рис. 2.84 Листовий зразок з прямокутною робочою ділянкою

Зразки з концентратором напружень використовуються для оцінки впливу концентрації напружень на втому при знакозмінному осьовому навантаженні, згині та крученні. Це зразки п'ятого, рис. 2.85, та шостого, рис. 2.87, типів, для виготовлення яких використовується пруток та товстий лист відповідно.

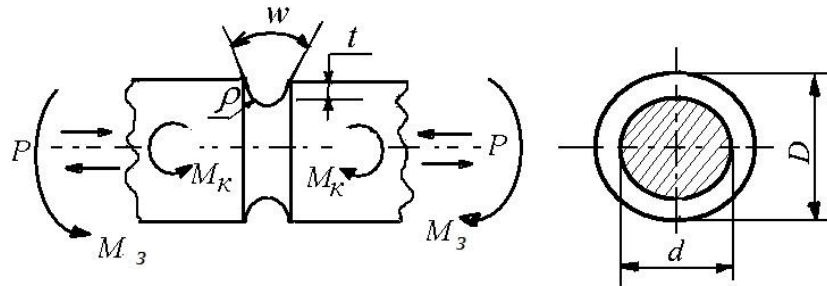


Рис. 2.85 Циліндричний зразок з концентратором напружень

Відомо, що концентрація напружень суттєво знижує довговічність за циклічного навантаження, що проілюстровано на рис. 2.86 де крива втоми, отримана на зразках з концентратором напружень (2), зміщується в область менших довговічностей порівняно з кривою втоми (1) для гладких зразків. Для вибору зразка за величиною теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ необхідно визначити його значення для деталі, що розглядається, а потім за цим значенням взяти з таблиці всі розміри, які регламентовані стандартом ГОСТ 23.026-78.

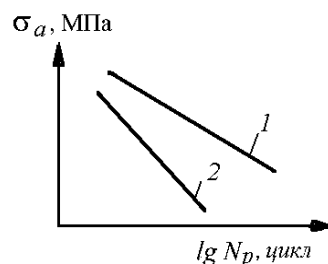


Рис. 2.86 Криві втоми гладких зразків (1) і зразків з концентраторами напружень (2)

Виготовивши партію таких зразків та провівши їх випробування на втому, можна встановити ступінь впливу концентраторів напружень із заданими значеннями теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ на довговічність у порівнянні з гладкими зразками, для яких $\alpha_\sigma = 1$, та оцінити для конкретної деталі ступінь небезпеки тих чи інших концентраторів.

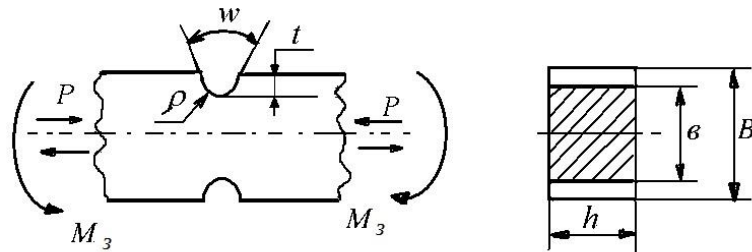


Рис. 2.87 Зразок з товстолистого матеріалу з концентратором напружень

Слід зазначити, що форма та розміри головок та перехідних ділянок зразків для випробувань на втому стандартами не регламентовані. Вони вибираються такими, щоб: забезпечити виключення люфтів у системі навантаження; забезпечити прикладення навантаження строго по осі зразка та строге центрування зразка; забезпечити виключення деформації головок, а також зминання, прослизання та руйнування на перехідних ділянках зразка та його головках.

На рис. 2.88 проілюстровано конструкцію реального зразка, що використовується для випробувань на втому при циклічному розтязі-стисканні на випробувальних машинах, що не мають гідрозахватів. Такий зразок є досить складним для виготовлення та кріплення у захватах випробувальної машини.

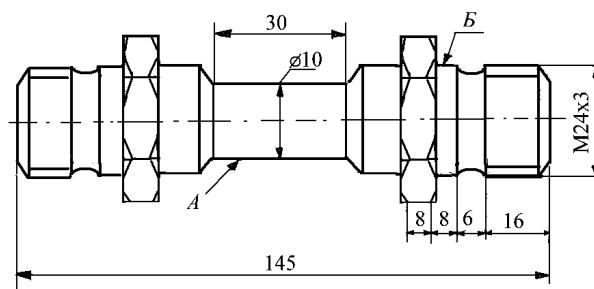


Рис. 2.88 Зразок для випробувань на втому при осьовому знакозмінному навантаженні (*Б* – посадковий пояс, співвісність якого відносно робочої циліндричної ділянки зразка *А* має бути не більше 0,02 мм).

Використання гідрозахватів дозволяє значно спростити конструкцію зразка, рис. 2.89, та трудомісткість його виготовлення.

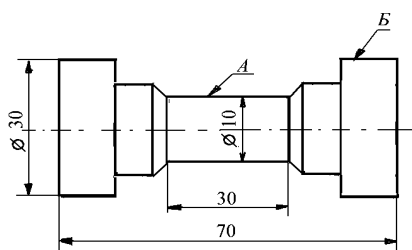


Рис. 2.89 Зразок для кріплення в гідрозахватах випробувальної машини навантаження (*Б* – посадковий пояс, співвісність якого відносно робочої циліндричної ділянки зразка *А* має бути не більше 0,02 мм).

2.4.7 Випробування за складного напруженого стану

Більшість елементів конструкцій працює в умовах складного напруженого стану, а їх умови міцності записуються для еквівалентних напружень з використанням характеристик міцності, що визначаються при випробуваннях на короткочасну міцність при лінійному напруженому стані, як:

$$\sigma_{екв} \leq [\sigma]; [\sigma] = \frac{\sigma_0}{n}; \sigma_0 \rightarrow \sigma_{\epsilon}, \sigma_T, \sigma_{0,2}, \sigma_{1,0}$$

де $\sigma_{екв}$ – еквівалентні напруження,

$[\sigma]$ – допустимі напруження,

n – коефіцієнт запасу міцності,

σ_0 – небезпечні напруження, що приймаються рівними границі міцності

σ_{ϵ} або границям плинності $\sigma_T, \sigma_{0,2}, \sigma_{1,0}$.

При складному напруженому стані опір деформуванню описується за допомогою теорій пластичності, а умови еквівалентності оцінюються за допомогою теорій міцності, адекватність яких перевіряється за випробувань в умовах складного напруженого стану. Для цього використовуються такі методи випробувань [27]:

- методи випробувань в обоймах та камерах;
- методи випробувань зразків з плоскими гранями в механічних реверсорах та гідрокамерах;
- методи випробувань у камерах високого тиску Бріджмена;
- методи випробувань з використанням трубчастих зразків в умовах плоского напруженого стану;
- методи випробувань з використанням листових хрестоподібних зразків;
- методи випробувань з використанням зразків із жорстким ободом (зразків Заверта);

- методи випробувань жорстко закріплених за контуром листових зразків за плоского напруженого стану за допомогою пуансонів та одностороннього випучення внутрішнім тиском.

Випробування в обоймах та камерах

Вперше випробування у спеціальних обоймах було проведено Кіком у 1892 році, який перевіряв справедливність гіпотези про пластичне деформування крихких матеріалів при всебічному (гідростатичному) стиску. Ним була використана обойма **1**, рис. 2.90, з пластичної сталі, заповнена сипучим матеріалом **4**, який забезпечував всебічне рівномірне стиснення зразка **3** з крихкого матеріалу при навантаженні обойми жорсткою плитою **2** зусиллям P . У процесі такого експерименту з використанням зразків з мармуру, кристалів кухонної солі, каменю та інших було встановлено, що при гідростатичному всебічному рівномірному стисканні крихкі матеріали деформуються пластично.

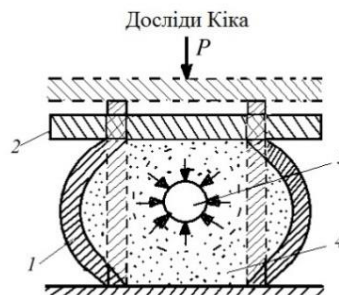


Рис. 2.90 Конструкція пристрою Кіка (**1** – обойма з пластичного матеріалу, **2** – жорстка плита із високоміцної сталі, **3** – зразок з крихкого матеріалу, **4** – аморфний матеріал – галун)

Досліди Кіка в 1951 році повторив киянин Грозін на зразках із загартованої сталі при їх гідростатичному стиску та показав, що за таких умов навантаження загартована сталь деформується пластично.

Випробування зразків із плоскими гранями

Зразки з крихких матеріалів із плоскими гранями випробовуються у механічних реверсах, рис. 2.91 або в гідравлічних камерах, рис. 2.92 в умовах плоского напруженого стану за двовісного стиску. Перевага механічних реверсів полягає в тому, що їх конструкція забезпечує двовісність навантаження зразка **1** завдяки використанню важелів **3** і пуансонів горизонтальних **2** за рахунок застосування навантаження P від захвата преса через балку **4**, рис. 2.91. Тобто їх перевага пов'язана з можливістю використання для випробу-

вань такого доступного обладнання, яким є преси та випробувальні машини для одновісного навантаження.

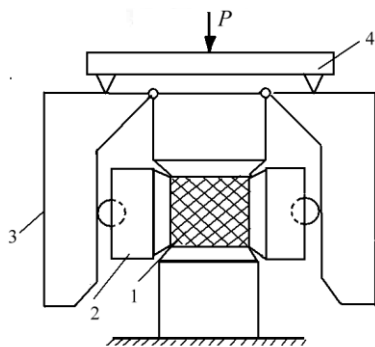


Рис. 2.91 Схема механічного реверсора: 1 – зразок, 2 – пуансони, 3 – силові важелі та 4 – плита

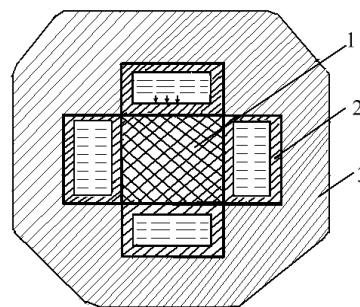


Рис. 2.92 Схема гідравлічної камери: 1 – зразок; 2 – локальні камери з еластичного матеріалу з використанням спеціальної гуми

При цьому механічні реверсори характеризуються низкою недоліків, що викликають зниження їх ефективного застосування. До них можна віднести, по-перше, можливість ексцентричного прикладання навантаження до зразка, по-друге, можливість розвитку в цьому випадку високих локальних контактних напружень, що може зумовити викривлення матеріалу на гранях, і по-третє, наявність тертя між поверхнями пуансону і зразка.

Недоліки механічних реверсорів при випробуваннях зразків з плоскими гранями можуть бути подолані, якщо для таких випробувань використовувати гідравлічну камеру, схема якої наведена на рис. 2.92.

Перевага такої камери пов'язана з виключенням за її використання ексцентриситету програми навантаження, забезпечення рівності контактних напружень по всій площині контакту локальних камер з гранями зразка, що забезпечує однорідність напруженого стану на робочій ділянці зразка.

До недоліків гідравлічних пристроїв можна віднести складність гідравлічного обладнання для створення високого тиску в камерах.

Необхідно підкреслити, що розглянуті вище обойми, реверсори та камери забезпечують при складному напруженому стані лише умови простого пропорційного навантаження, при якому співвідношення між головними напруженнями залишаються постійними протягом усієї історії навантаження зразків. Такої вади позбавлені камери високого тиску Бріджмена

Камери високого тиску Бріджмена

У цих камерах можна створювати тиск до 30000 атм (3000 МПа) завдяки використанню ущільнювачів, що самоущільнюються, проводити випробування в умовах простого пропорційного ($\kappa = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = const$) і складного непропо-

рційного ($\kappa = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \neq const$) навантажень. Нагадаємо, що просте пропорційне навантаження - це навантаження, при якому співвідношення між головними напруженнями не змінюється при збільшенні навантажень від нуля до робочого рівня.

Камери Бріджмена дозволяють незалежно навантажувати суцільний зразок зовнішнім тиском q , крутним моментом $M_{кр}$ і осьовим навантаженням розтягом-стисканням P , рис. 2.93, і отримувати не тільки широкий спектр складних напружених станів у зразку, а й незалежно управляти в процесі навантаження законом зміни кожного головного напруження та здійснювати різні режими складного (непропорційного) навантаження.

До недоліків випробувань у камерах Бріджмена можна віднести використання суцільних та товстостінних циліндричних зразків, у яких в перерізі спостерігається градієнт напружень через вплив зовнішнього тиску і формується неоднорідний напружений стан.

У 50-х роках минулого століття почали випробовувати тонкостінні трубчасті зразки під дією внутрішнього тиску, застосування яких дозволило виключити недоліки механічних випробувань у камерах Бріджмена.

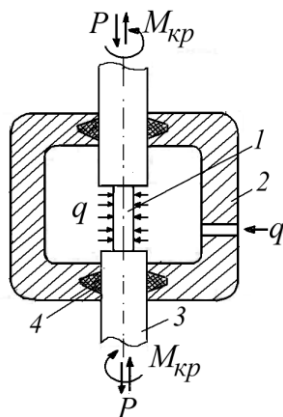


Рис. 2.93 Схема камери Бріджмена:
1 - зразок суцільний циліндричний,
2 - камера високого тиску,
3 - тяги,
4 - ущільнення

Методи випробувань тонкостінних трубчастих зразків

При випробуваннях трубчастих зразків здійснюється навантаження внутрішнім тиском q , крутним моментом $M_{кр}$ і силами розтягу (стиску) P , рис. 2.94. Незалежно змінюючи зовнішні навантаження, можна реалізовувати будь-яку траєкторію складного навантаження. Вважається, що в стінках тонкостінної трубки має місце плоский напружений стан з будь-яким співвідношенням основних напружень. При цьому в стінці трубки в загальному випадку діють окружні σ_θ , осьові σ_z та радіальні напруження σ_r . Але для тонкостінного зразка приймається, що радіальні напруження близькі до нуля.

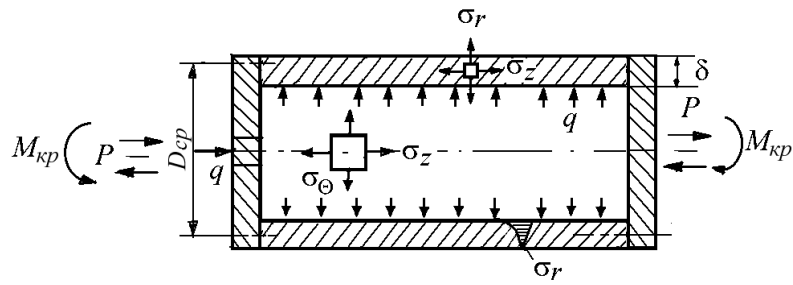


Рис. 2.94 Схема напруженого стану тонкостінного трубчастого зразка

Якщо прийняти, що $\sigma_\theta = \sigma_1$, а $\sigma_z = \sigma_2$, то співвідношення основних напружень $\kappa = \frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$. Для різних характерних окремих випадків дії окремих навантажень k має різну величину.

Так, якщо діє тільки внутрішній тиск q , то $k = 0,5$. У цьому випадку руйнування трубчастого елемента відбувається за твірною А рис. 2.95.

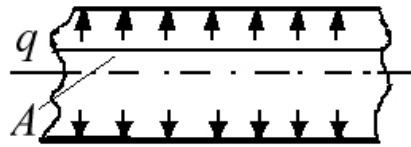


Рис. 2.95 Схема траєкторії тріщини в трубці під час дії тиску q

Якщо діють q і P , то k може приймати будь-які значення. При дії лише зовнішньої сили P $k = \infty$ (розтяг) і $k = -\infty$ (стиск).

Відношення товщини трубки δ до її середнього діаметру D_{cp} не повинно виходити за межі $0,02 \leq \frac{\delta}{D_{cp}} \leq 0,08$, що відповідає товщинам стінок, при яких можна знехтувати впливом радіального напруження σ_r , з одного боку, а з іншого – не допустити втрати пластичної стійкості трубчастого зразка при прикладенні крутного моменту $M_{кр}$, і стискаючої сили P .

Для виключення впливу крайових ефектів у зоні головок зразків, через які здійснюється навантаження, та забезпечення однорідності поля напружень відношення робочої довжини зразка L до середнього діаметру D_{cp} має бути достатньо великим $\frac{L}{D_{cp}} > 2,5$, а різнотовщинність стінок за довжиною зразка не повинна перевищувати 2%.

Конструкція захватів та зразка повинна забезпечувати його жорстке центрування у захватах.

Після виготовлення зразки повинні піддаватися відпалу для зняття залишкових напружень, що виникають при їх виготовленні.

Для випробувань при плоскому напруженому стані використовуються два типи зразків: **перший тип** – це зразки, виготовлені із суцільнотягнутої труби, рис. 2.96 на яку накручується гофр для надійного кріплення в захватах.

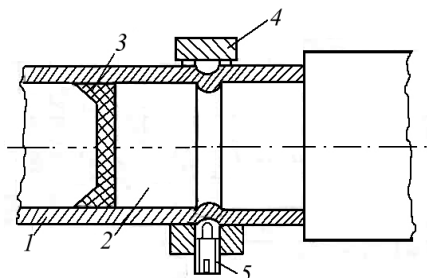


Рис. 2.96 Зразок із цільнотягнутої труби: 1 – зразок, 2 – тяга (захват), 3 – ущільнювальна прокладка, 4 – кріпильне кільце та 5 – фіксуючий гвинт

До **другого типу** можна віднести зразки трубчасті, виготовлені з прутка: це зразки з різьбовими головками, рис. 2.97, та зразки з гладкими циліндричними головками, рис. 2.98.

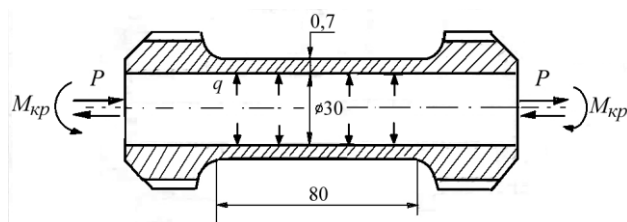


Рис. 2.97 Зразок з різьбовими головками

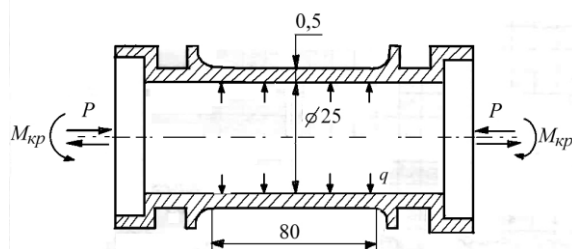


Рис. 2.98 Зразок із циліндричними головками

З використанням цих зразків можна отримувати будь-яке співвідношення головних напружень k та будь-які довільні траєкторії складного навантаження.

За результатами випробувань в умовах складного напруженого стану прийнято будувати узагальнені діаграми деформування в координатах «інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ε_i », вирази для визначення яких у загальному вигляді можна записати як

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.11)$$

На рис 2.99 наведено такі узагальнені діаграми для різних співвідношень головних напружень k .

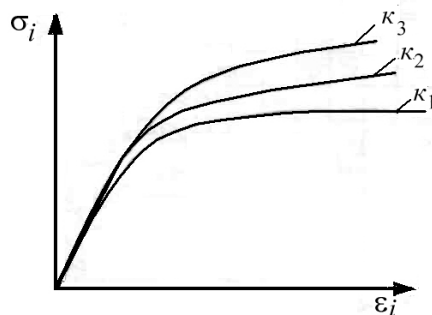


Рис. 2.99 Узагальнені діаграми деформування

В ідеальному випадку для ізотропного матеріалу усі узагальнені діаграми в координатах $\sigma_i - \varepsilon_i$ при різних значеннях k повинні лягати на одну криву. Однак для реальних ізотропних матеріалів отримують різні узагальнені діаграми залежно від k .

В даний час трубчасті зразки знаходять широке застосування при дослідженні впливу складного напруженого стану на особливості деформування та руйнування конструкційних матеріалів для перевірки адекватності відомих теорій міцності та побудови граничних кривих і граничних поверхонь. Разом із цим вони мають ряд недоліків. До них можна віднести насамперед нехтування впливом радіальних напружень, що діють у стінці трубки. Крім того, з використанням трубчастих зразків при навантаженні внутрішнім тиском не можна досліджувати вплив виду напруженого стану на концентрацію напружень і на тріщиностійкість; також із їх використанням не можна досліджувати вплив виду напруженого стану на поведінку тонколистових матеріалів, так як для виготовлення цих зразків необхідно використовувати прутки або товстолістовий прокат.

Листові хрестоподібні зразки

Цей тип зразків застосовується виключно для дослідження тонколистових матеріалів. До обмежень використання таких зразків можна віднести таке:

– для тонколистових матеріалів можна отримувати лише плоский напружений стан всебічного розтягу ($\sigma_1 > 0$; $\sigma_2 > 0$), так як при стисканні відбуватиметься втрата стійкості;

– випробування цих зразків можна проводити тільки при малих пластичних деформаціях для матеріалів, що зміцнюються, а для знеміцнюваних ма-

теріалів дослідження можна проводити практично тільки в умовах пружного деформування;

– в установках для випробувань таких зразків у зв'язку з їхніми великими габаритами використовується складна система силовантаження, заснована на застосуванні плаваючих захватів для запобігання перекосу зразка, що вимагає використання автоматизованих комп'ютерних систем відслідковування, і відповідного висококваліфікованого обслуговування.

Історично на перших етапах дослідження листових матеріалів використовувалися зразки прямокутної форми з нанесеними на межі контуру отворами, через які прикладалося навантаження, рис. 2.100. Проте для таких зразків неможливо отримувати коректні результати, оскільки у зонах зразка (на рис. 2.100 показані штриховою) між отворами та його контуром відбувається короблення матеріалу, що викликає порушення однорідності поля напружень на робочій ділянці зразка.

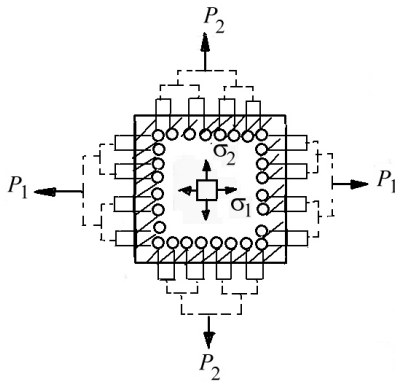


Рис. 2.100 Конструкція листового зразка для випробувань на двовісний розтяг

Цей недолік виключено завдяки використанню хрестоподібних зразків, рис. 2.101, на чотирьох листових голівках на які нанесені наскрізні пази (на зразку рис. 2.101 на кожній голівці виконано по 20 пазів шириною 1 мм), що виключає можливість короблення захватних ділянок та забезпечує формування на робочій центральній ділянці однорідного напруженого стану.

Це позитивний ефект від нанесення пазів, але при цьому зменшується площа поперечного перерізу захватів F_3 у порівнянні з поперечним перерізом зразка на робочій ділянці F_0 ($F_3 = 0,8 F_0$), тому напруження в захватах перевищують робочі напруження σ_0 пропорційно зменшенню площі F_3 ($\sigma_3 = 0,8 \sigma_0$). Останнє пояснює обмеження на пластичне деформування зміцнюваних матеріалів, рис. 2.102а, і таких, що зміцнюються незначно, рис. 2.102б; при цьому і в першому та в другому випадку неможливо довести до руйнування зразок на робочій ділянці.

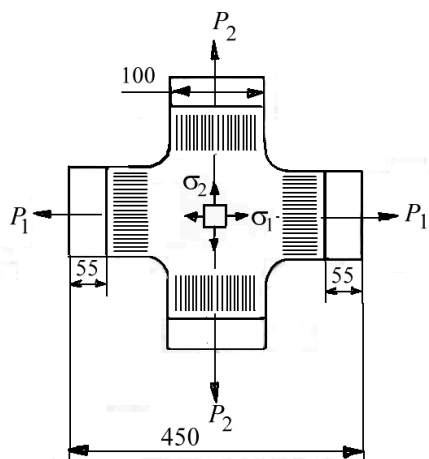


Рис. 2.101 Хрестоподібний зразок

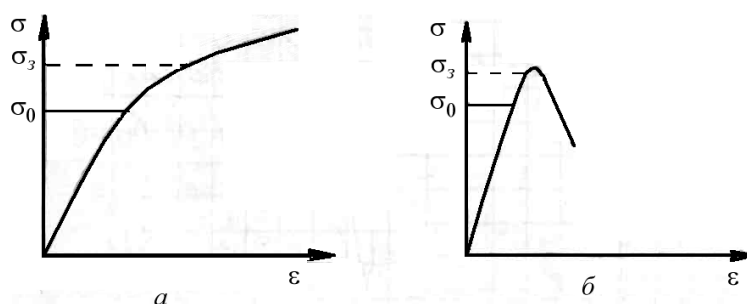


Рис. 2.102. Діаграми деформування зміцнюваних (а) та знеміцнюваних (б) матеріалів

Обійти зазначений недолік хрестоподібних зразків можна шляхом вифрезерування матеріалу на робочій ділянці зразка до меншої товщини симетрично щодо серединної поверхні, рис.2.103.

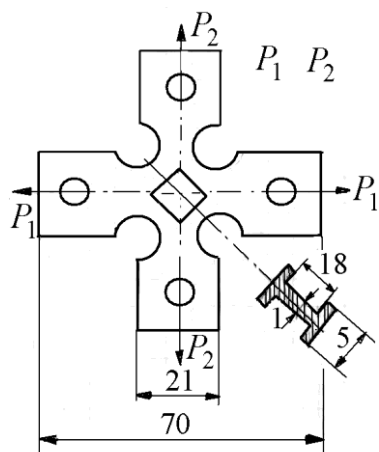


Рис. 2.103 Малогабаритний хрестоподібний зразок

У цьому випадку суттєво зменшуються габаритні розміри зразка, а його пластичне деформування та руйнування локалізуються на робочій виточеній ділянці. Однак при цьому порушується основна вимога стандарту до виготовлення листових зразків, що не дозволяє видалення поверхневих зміцнень під час прокатування шарів листа.

Листові зразки з твердим ободом (Заверта)

Зразки з жорстким ободом дозволяють отримувати плоский напружений стан на їх робочій ділянці з використанням випробувальних машин на одно-вісний розтяг, які використовуються для випробувань на короточасну міцність. Прикладаючи до такого зразка навантаження розтягу, можна отримати плоский напружений стан з напруженнями різних знаків, рис. 2.104а або одного знака, рис. 2.104б.

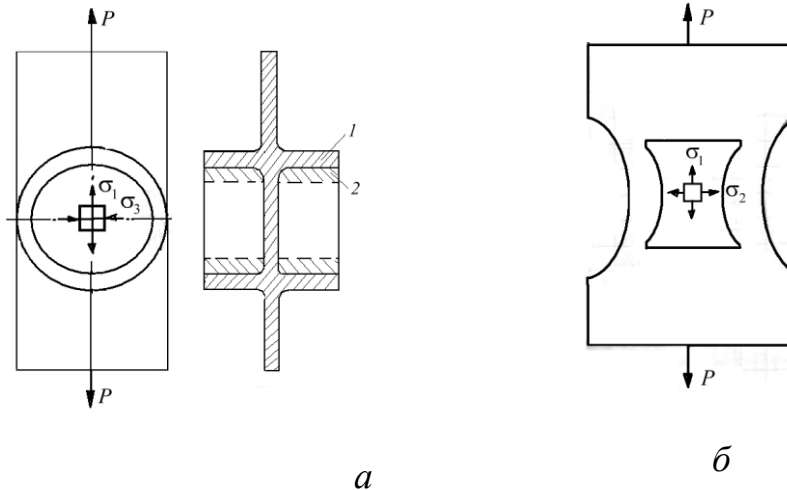


Рис. 2.104 Зразки з жорстким ободом для отримання напружень протилежного (а) та одного (б) знаків: 1 – зразок, 2 – змінні втулки, що забезпечують варіацію напруженого стану

Зразки з жорстким ободом виготовляються з товстолистового матеріалу і характеризуються тим самим недоліком, що і хрестоподібні зразки, рис. 2.103 – необхідністю видалення поверхневих зміцнених шарів при прокатці.

Випробування тонколистових зразків, жорстко защемлених по контуру

Випробовувати листові зразки при плоскому напруженому стані без видалення зміцнених поверхневих шарів можна двома способами: за допомогою внутрішнього тиску при їх жорсткому закріпленні по контуру, рис. 2.105а, або пуансонами, рис. 2.105б. У першому випадку зразок 1 навантажується внутрішнім тиском, який подається в камеру 2. Змінюючи конфігурацію камери від круглої до еліптичної з різними півосями, отримують різне співвідношення між головними напруженнями розтягу. При навантаженні жорстко закріпленого зразка 1 пуансоном 2 також можна змінювати співвідношення між головними напруженнями, змінюючи конфігурацію кромки, що навантажує пуансона.

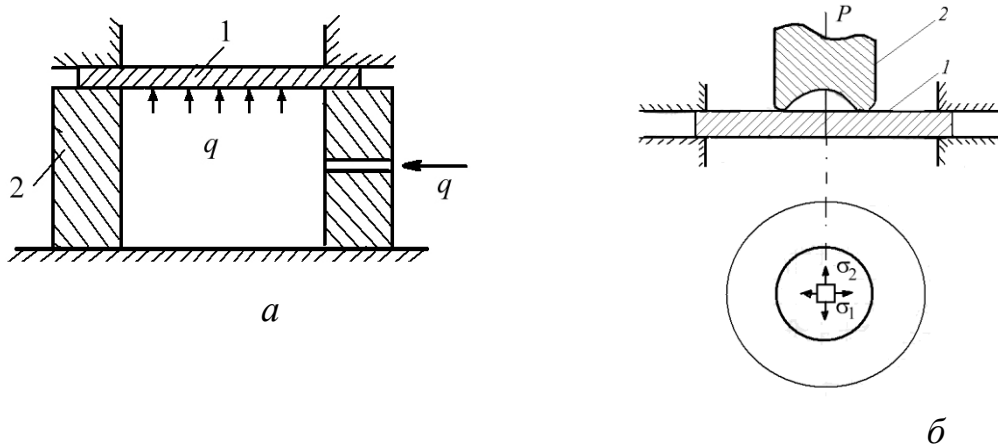


Рис. 2.105 Листові зразки при навантаженні тиском (а) та пуансоном (б)

2.5 Методи визначення характеристик в'язкості руйнування

2.5.1 Визначення характеристик тріщиностійкості

Механіка руйнування займається вивченням поведінки матеріалів із дефектами типу тріщин. Вихідне положення механіки руйнування полягає в тому, що руйнування будь-якої деталі, елемента конструкції та споруди відбувається в результаті розвитку до критичної величини тріщин, що утворилися в процесі виготовлення або експлуатації деталей [30].

Механіка руйнування як наука поділяється на два розділи: **лінійну** (ЛМР) та **нелінійну** (НЛМР) механіку руйнування.

У межах **лінійної механіки** руйнування розробляються способи розрахунку тіл із тріщинами, у вершині яких матеріал деформується пружно, тобто ЛМР досліджує крихке руйнування тіл із тріщинами. Засновником ЛМР можна вважати Гріффітса, який у 1920 р. опублікував перші роботи в галузі ЛМР.

Нелінійна механіка руйнування пов'язана з розробкою методів розрахунку тіл з тріщинами, у вершині яких відбувається пружнопластичне деформування матеріалу та руйнування яких має квазікрихкий або пластичний характер.

Методи визначення характеристик тріщиностійкості регламентовані стандартом ГОСТ 25.506-85 «Методи механічних випробувань металів. Визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні» [17].

Характеристики тріщиностійкості

Тріщиностійкістю (в'язкістю руйнування) називається здатність матеріалу чинити опір розвитку тріщин. Прийнято вважати, що плоска аномалія суцільності матеріалу, що розвивається, – це тріщина; аномалія, що не розвивається – це дефект.

Методи механіки руйнування дозволяють описати зв'язок між номінальними напруженнями в деталі, розмірами тріщин та опором матеріалу їх стабільному та нестабільному розвитку. Опір матеріалу стабільному та нестабільному розвитку оцінюється та описується за допомогою характеристик тріщиностійкості. Характеристики тріщиностійкості поділяються на три групи, це:

– ***силові характеристики тріщиностійкості*** – характеристики лінійної механіки руйнування;

– ***деформаційні характеристики тріщиностійкості*** – характеристики нелінійної механіки руйнування;

– ***енергетичні характеристики тріщиностійкості*** – характеристики лінійної та нелінійної механіки руйнування

Силові характеристики тріщиностійкості

K – коефіцієнт інтенсивності напружень – основна характеристика тріщиностійкості у ЛМР;

K_c – критичне значення K при плоскому напруженому стані;

K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} – критичні значення K при плоскому деформованому стані для тріщин мод I, II, III.

Ці характеристики запропонував Ірвін у 1957 р.

Деформаційні характеристики тріщиностійкості

δ_c – критичне розкриття у вершині тріщини; цю характеристику запропонували у 1959 р. Леонов та Панасюк (львівська школа механіків);

K_δ – коефіцієнт інтенсивності деформацій (ця характеристика практично не використовується).

Енергетичні характеристики тріщиностійкості

J_c – J – інтеграл Черепанова (теорія) – Райса (практика), 1967 р.;

J_c – критичне значення J – інтеграла при плоскому напруженому стані;

J_{Ic} , J_{IIc} , J_{IIIc} – критичні значення J – інтеграла Черепанова-Райса при плоскому деформованому стані для тріщин мод I, II, III.

Інтеграл Черепанова-Райса чисельно є питомою роботою (енергією) просування тріщини на одиницю довжини.

Основні характеристики механіки руйнування: K_{Ic} , δ_c , J_c , J_{Ic} .

Для того щоб розрахувати граничний стан деталі з дефектом (тріщиною), що розвивається необхідно знати K_{Ic} для цього матеріалу або значення J_c або δ_c – для пластичних листових матеріалів

Стадії розвитку тріщин(класифікація)

Розвиток тріщин відбувається на двох типових стадіях: стабільного розвитку I від вихідної довжини тріщини a_0 та нестабільного розвитку II, яка завершується повним руйнуванням елемента конструкції, рис. 2.106. Перехід від I до II стадії відбувається за досягнення тріщиною критичної довжини $a_{кр}$ цей момент у часі позначається буквою «С», яка є початковою в англійському слові «critical» – «критичний». У механіці руйнування всі критерії та параметри тріщиностійкості, що відповідають моменту переходу від стабільного до нестабільного етапу розвитку, називаються критичними та позначаються цією літерою K_c ; K_{Ic} ; K_{IIc} ; K_{IIIc} ; J_c ; J_{Ic} .

Для росту тріщини на стадії стабільного розвитку необхідне підживлення її енергією при циклічному навантаженні або зі збільшенням статичного навантаження. На другій стадії відбувається неконтрольований розвиток тріщини за рахунок накопиченої на стадії стабільного розвитку енергії пружного деформування.

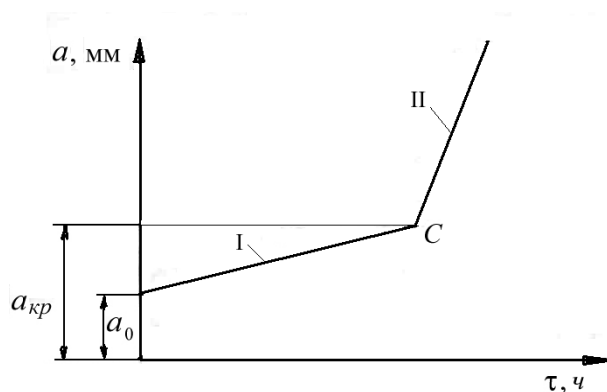


Рис. 2.106 Стадії розвитку тріщини:

I – стадія стабільного розвитку;
 II – стадія нестабільного розвитку тріщин (a_0 – початкова довжина дефекту;
 $a_{кр}$ – критична довжина тріщини, за якої стартує її неконтрольований розвиток;
 τ – час; C – момент переходу від стабільного до нестабільного розвитку тріщини;
 a – довжина тріщини)

Напруження у вершині тріщини

Вестергаардом у період 1933-1939 р.р. запропоновано рівняння, що дозволяє визначати напруження у вершині тріщини, розташованої в пластині нескінченних розмірів, в якій діє однорідне поле номінальних напружень σ від зовнішніх навантажень, рис. 2.107 [30]. На рис. 2.107 початок координат

збігається з вершиною тріщини, а елементарний об'єм, для якого записані вирази для напружень $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$, знаходиться на радіус-відстані r , розташованої під кутом φ .

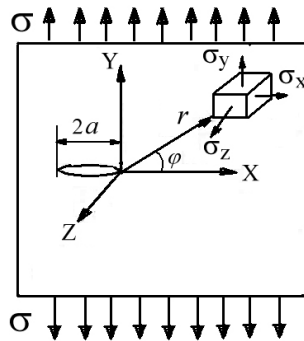


Рис. 2.107 Схема нескінченної пластини з тріщиною довжини $2a$

$$\sigma_y = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right), \quad (2.12)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right), \quad (2.13)$$

$$\sigma_z = \mu(\sigma_y + \sigma_x). \quad (2.14)$$

Напруження, що визначає розвиток наведеної на рис. 2.107 тріщини є напруження відриву σ_y у вершині тріщини, яке спрямоване по нормалі до площини тріщини, запишемо його значення для $\varphi = 0$.

У цьому випадку

$$\sigma_y = \frac{\sigma(\pi a)^{1/2}}{(2\pi r)^{1/2}}, \quad (2.15)$$

при $r = 0$, $\sigma_y = \infty$, а якщо $r = \infty$, то $\sigma_y = 0$.

Зазначимо, що відповідно до виразу (2.15) значення σ_y дорівнюють номінальним напруженням у пластині тільки при $r = \frac{1}{2}a$:

$$\sigma_y = \sigma.$$

Отже формули (2.12–2.15) працюють лише у дуже малій області у вершині тріщини ($\frac{1}{2}a$), коли зона пластичної деформації дуже мала, і тому вони справедливі практично лише для крихких матеріалів.

На рис. 2.108 наведено розподіл напружень у вершині тріщини; при цьому верхня ділянка кривої розподілу обмежена штриховою лінією: тут має місце згладжування кривої за рахунок пластичного деформування матеріалу

при досягненні границі плинності, і очевидно, що напруження σ_y у вершині тріщини не можуть досягти нескінченності.

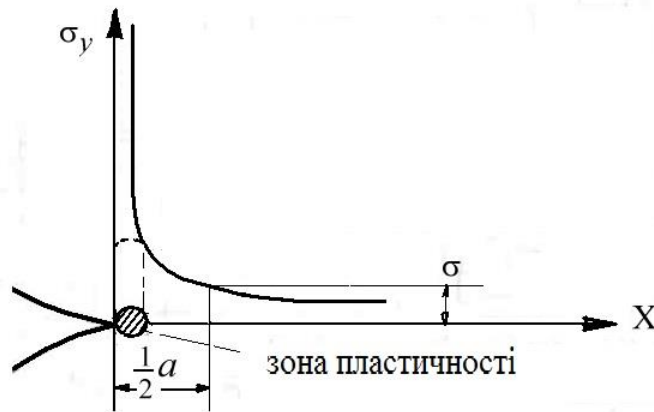


Рис. 2.108 Схема розподілу напружень у вершині тріщини

При $r > \frac{1}{2}a$ відповідно до рівняння (2.15) напруження σ_y досягають значень, менших значень номінальних напружень σ , і при $r \rightarrow \infty$ прямують до нуля, що теж неможливо, так як найменші нормальні напруження в пластині, орієнтовані по осі y , не можуть бути меншими за номінальні напруження σ .

Ірвін в 1957 р. запропонував чисельник у співвідношенні (2.15), що характеризує крутість поля напружень σ_y в околі вершини тріщини, позначати літерою K і назвав цю величину **коефіцієнтом інтенсивності напружень**:

$$K = \sigma(\pi a)^{1/2}. \quad (2.16)$$

Як уже згадувалося вище, ця величина прийнята як силова характеристика тріщиностійкості матеріалу і має розмірність $\frac{H}{M^{3/2}}$ або $MPa\sqrt{m}$.

Моделі, моди або схеми розвитку тріщин (типи тріщин)

Усі види тріщин залежно від особливостей їх розвитку поділяються на три типи [30].

I тип – тріщини відриву – це тріщини, розкриття яких відбувається по нормалі до берегів тріщини під впливом сил P , рис. 2.109.

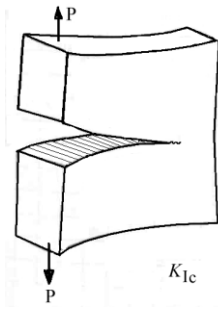


Рис. 2.109 Тріщина відриву

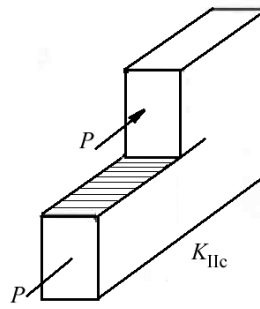


Рис. 2.110 Тріщина поперечного зсуву

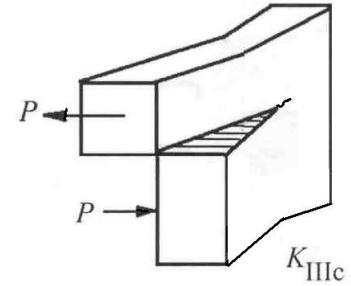


Рис. 2.111 Тріщина повздовжнього зсуву

II тип – тріщини поперечного зсуву в площині; для них виникає взаємне переміщення берегів тріщини в одній площині по нормалі до фронту тріщини, рис. 2.110.

III тип – тріщини повздовжнього зсуву; для цього типу тріщин її берега зміщуються в одній площині паралельно до фронту тріщини, рис. 2.111.

Для розглянутих мод тріщин критерії тріщиностійкості позначаються відповідно як K_{Ic} і J_{Ic} ; K_{IIc} і J_{IIc} ; K_{IIIc} і J_{IIIc} .

Напружено-деформований стан у вершині тріщини

Для листових пластичних матеріалів невеликої товщини деформування у бік осі не обмежене, рис. 2.107, тому при дії номінальних напружень σ $\sigma_y \neq 0$, $\sigma_z = 0$, $\sigma_x \neq 0$, $\varepsilon_z \neq 0$. У цьому випадку у вершині тріщини реалізується умова плоского напруженого стану – ПНС. Характеристики тріщиностійкості для плоского напруженого стану позначаються як K_c , J_c і δ_c . При ПНС у вершині тріщини **відбувається пластичне деформування** матеріалу і руйнування має квазікрихкий або в'язкий характер.

Для товстих листів малопластичних матеріалів і умов високошвидкісного навантаження деформації у бік осі z обмежені і тому $\varepsilon_z = 0$, $\sigma_y \neq 0$, $\sigma_x \neq 0$, $\sigma_z \neq 0$, і у вершині тріщини реалізується умова плоского деформованого стану – ПДС. У вершині тріщини матеріал знаходиться в умовах всебічного розтягу і **відбувається крихке руйнування**. Для випадку ПДС характеристики тріщиностійкості позначаються як K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} и J_{Ic} , J_{IIc} , J_{IIIc} .

Характеристики тріщиностійкості K_c , J_c і δ_c називаються параметрами в'язкого руйнування. Вони залежать від номінальних напружень, що діють в елементі конструкції, розмірів елемента, розмірів тріщини і тому характеризують стан конкретної елемента.

Величини K_{Ic} , J_{Ic} є критеріями граничного стану матеріалу із тріщиною. Вони не залежать від розмірів деталі та тріщини та величини номінальних напружень; їх значення постійні для конструкцій одного типу та певної товщини. Ці величини визначаються при ПДС, використовуються для розрахунку конструкцій та є **критеріями тріщиностійкості**.

У той же час критерії тріщиностійкості, як і інші механічні характеристики матеріалу, залежать від структурного стану та властивостей матеріалу, швидкості навантаження і температури.

При цьому K_{Ic} є нижньою межею зміни K_c , і K_c , які завжди більше K_{Ic} для того самого матеріалу.

Як показано на рис. 2.112, при товщинах матеріалу великих B_{min} , при яких відбувається трансформація ПНС в ПДС у вершині тріщини, реалізується тільки крихке руйнування та нижня межа граничної кривої в координатах $K_c - B$ у цьому випадку відповідає K_{Ic} .

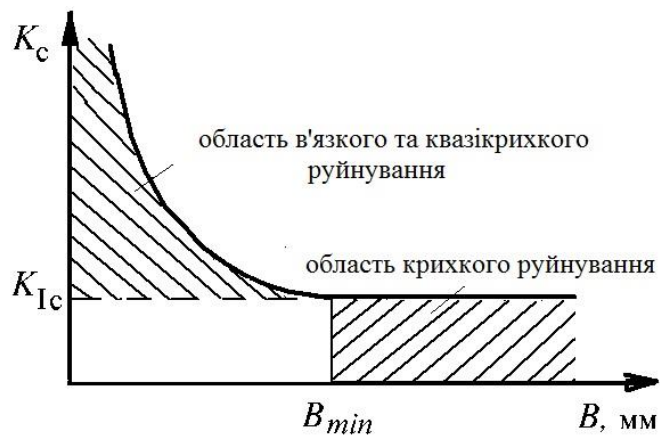


Рис. 2.112 Залежність коефіцієнта інтенсивності напружень від товщини зразка для тріщин критичної довжини

Очевидно, що для реальних конструкцій краще щоб відбулось в'язке руйнування, наслідки якого менш непередбачувані і катастрофічні, ніж для крихкого.

Зміну характеру руйнування і виду напружено-деформованого стану в залежності від товщини B елемента конструкції можна також оцінювати, як показано на рис. 2.113, за часткою прямого зламу $\frac{x}{B} \cdot 100\%$. Рис. 2.114 ілюструє характер руйнування при різних зламах пластин.

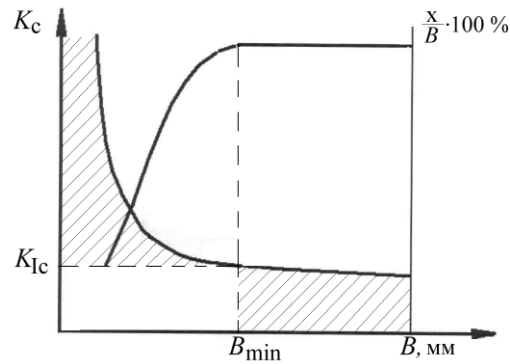


Рис. 2.113 Залежність частки прямого зламу $\frac{x}{B} \cdot 100\%$ и K_{Ic} від товщини матеріалу

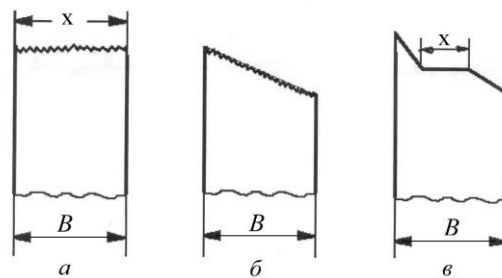


Рис. 2.114 Схема характеру руйнування:

- a* – абсолютно крихке руйнування;
- б* - в'язке руйнування (тонколистові пластичні матеріали);
- в* - квазікрихке руйнування

2.5.2 Зразки та діаграма розкриття тріщини для визначення характеристик тріщиностійкості

Стандарт ГОСТ 25.506-85 [17] рекомендує чотири типи зразків для визначення характеристик в'язкості руйнування, назва та розміри яких наводяться нижче.

I тип: плоский прямокутний зразок із центральною тріщиною для випробувань на осевий розтяг, рис 2.115.

$$B_{\min} = 1 \text{ мм}; \quad W_{\min} = 50 \text{ мм};$$

$$W \geq 8B; \quad L \geq 2W$$

(L - відстань між захватами; W - ширина зразка, B - товщина зразка; $2a$ - довжина тріщини).

Цей тип зразків використовується для випробувань лише для тонколистових матеріалів.

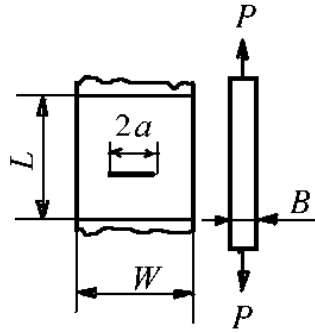


Рис. 2.115 Тонколистий зразок

II тип: циліндричний зразок з кільцевою тріщиною для випробувань на осьовий розтяг, рис. 2.116:

$$D_{\min} = 12 \text{ мм} \quad L \geq 5D$$

(L – відстань між захватами, D – номінальний діаметр зразка).

Цей тип рекомендується використовувати для визначення характеристик тріщиностійкості матеріалу з прутка або товстого листа.

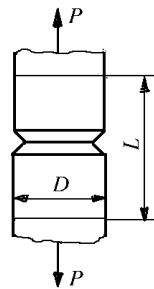


Рис. 2.116 Зразок із прутка

III тип: прямокутний компактний зразок із крайовою тріщиною для випробувань на позацентровий розтяг, рис. 2.117.

Для зразків цього типу основним розміром є товщина B , а всі інші розміри розраховуються залежно від B :

$$W = 2B; \quad D = 0,5B; \quad a \geq (0,9 \div 1,1)B; \quad G = 2,5B; \quad H = 2,4B;$$

$$N = B/8; \quad L = 0,8B; \quad S = 1,1B; \quad l \approx 1,25 \text{ мм.}$$

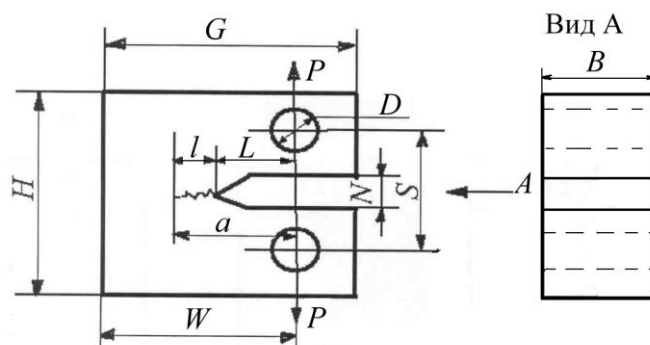


Рис. 2.117 Компактний зразок

Мінімальну товщину для компактних зразків рекомендується приймати $B_{\min} = 20$ мм. У міжнародній літературі зразки типу III прийнято називати компактними або **CT (Compact Tension)**.

Формула для визначення розрахункового значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_Q за результатами випробування компактних зразків має вигляд:

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (2.17)$$

де K_Q – розрахункове значення коефіцієнта інтенсивності напруг;

P_Q – розрахункове навантаження, що визначається за діаграмою розкриття тріщини;

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ – функціонал, наведений у нормативних документах.

IV тип: плоский прямокутний зразок з крайовою тріщиною для випробувань на 3-х точковий згин, рис.2.118.

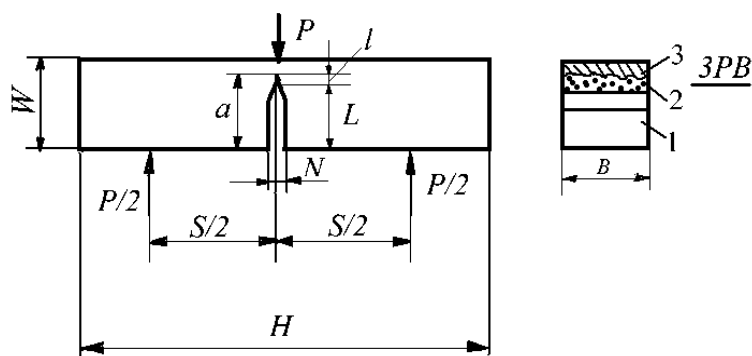


Рис. 2.118 Зразки для випробувань на триточковий згин: 1 - зона надрізу, 2 - тріщина втоми, 3 - зона долому

Для цього типу зразків, так само як і для компактних, основним розміром є товщина B , інші розраховуються як:

$$\begin{aligned} W &= 2B; & H &= 9B; & S &= 8B; \\ N &= B/8; & L &= 0,8B; & l &\approx 1,25 \text{ мм}; & a &\geq (0,9 \div 1,1)B. \end{aligned}$$

Мінімальну товщину для цих зразків рекомендується приймати $B_{\min} = 10$ мм.

У міжнародній літературі ці зразки прийнято називати **3PB (3 Point Bending)**. Формула для визначення K_Q для зразків цього типу має вигляд:

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (2.18)$$

де P_Q – розрахункове навантаження, S, B, W, a – розміри зразка та тріщини.

При випробуваннях зразків III та IV типу отримують рівноцінні значення характеристик тріщиностійкості, проте компактні зразки вимагають використання для виготовлення та випробування складнішого обладнання, ніж ЗРВ.

У всіх цих чотирьох типах зразків перед випробуваннями потрібно вирощувати тріщину втоми довжиною l . До її виготовлення пред'являються такі вимоги:

- циклічне напруження не повинно перевищувати $0,5\sigma_T(\sigma_{0,2})$;
- число циклів навантаження не повинно бути меншим $5 \cdot 10^4$ циклів;
- для зразків I, III і IV типів коефіцієнт асиметрії циклу $r_\sigma = 0,1 \dots 0,2$,

тобто повинен реалізовуватися пульсуючий цикл навантаження, а для зразків II типу випробування необхідно проводити при симетричному циклі знакозмінного навантаження ($r_\sigma = -1$).

Діаграми для визначення характеристик тріщиностійкості

Для визначення характеристик в'язкості руйнування використовуються діаграми розкриття тріщин, які записуються в процесі випробувань у координатах: «навантаження P – зміщення берегів надрізу V » або «навантаження P – прогин f », рис. 2.119.

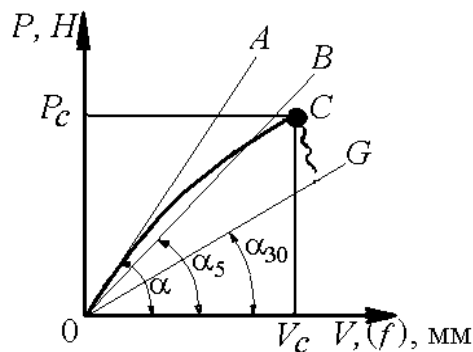


Рис. 2.119 Діаграми розкриття тріщини

За цими діаграмами визначаються розрахункові значення навантаження P_Q , що входить до рівнянь (2.17) та (2.18) для визначення розрахункового коефіцієнта інтенсивності напружень K_Q і енергії просування тріщини при визначенні J -інтеграла Черепанова-Райса

Схема запису діаграм розкриття тріщини показано на рис. 2.120. Тут на лицьовій ділянці компактного зразка l встановлюються ножі 2, з якими контактують пружні елементи 3 з наклеєними на них тензорезисторами 4.

При навантаженні зразка 1 навантаженнями P відбувається розкриття берегів надрізу, деформування пружних елементів 3 з тензорезисторами 4 і сигнал розбалансу мостової схеми за допомогою тензорезисторного перетворювача переміщень 5 передається на двокоординатний самописець 7 або ПК. Сигнал навантаження на самописець або ПК передається від тензорезисторного перетворювача сили 6 .

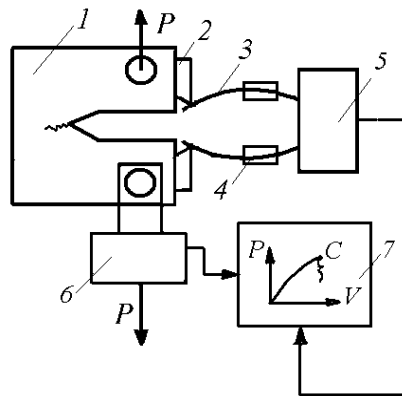


Рис. 2.120 Схема запису діаграми розкриття тріщини при випробуваннях компактних зразків

Для визначення розрахункового значення навантаження P_Q необхідно проводити графічну обробку кривих розкриття тріщин, наносячи на апаратурно записану діаграму промені OA , OB та OG , рис. 2.119.

В даному випадку OA є дотичною до кривої розкриття тріщини, а прямі OB та OG відповідно 5- та 30-відсотковими січними, які розташовані під кутами α_5 і α_{30} до осі абсцис, рис. 2.119. Значення цих кутів, що відповідають нахилу січних OB та OG , знаходяться із співвідношення

$$tg\alpha_5 = 0,95tg\alpha, \quad tg\alpha_{30} = 0,70tg\alpha,$$

де α - кут нахилу дотичної OA до осі абсцис.

Інструментальна схема запису діаграм

Розглянемо чотири типи характерних діаграм розкриття тріщини, що зустрічаються при випробуваннях зразків на в'язкість руйнування, способи їх обробки та знаходження розрахункового навантаження P_Q .

До першого типу відповідно до стандарту ГОСТ 25.506-85 відносяться діаграми при крихкому та квазікрихкому руйнуванні, які розташовані між OB – 5 % січної та OA – дотичної до діаграми на початку координат. Для діаграм такого типу приймається $P_Q = P_c$, рис. 2.121.

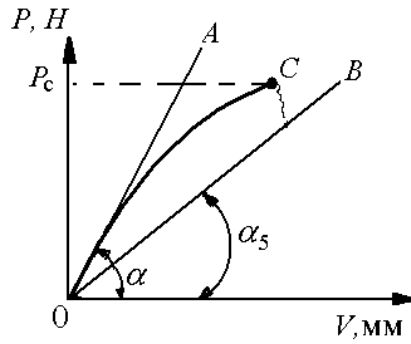


Рис. 2.121 Крива розкриття тріщини типу I

До другого типу віднесено діаграми з проміжним максимумом навантаження D , рис.2.122. Точка C , що відповідає переходу від стабільного до нестабільного розвитку тріщини, і розташована між 5-% і 30-% січними OB і OG .

Розрахункове значення навантаження P_Q у цьому випадку приймається відповідним ординаті т. D : $P_Q = P_D$ (D – локальний максимум).

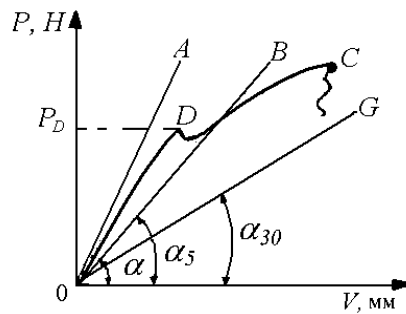


Рис. 2.122 Крива розкриття тріщини з локальним максимумом навантаження

Для третього типу діаграм т. C знаходиться між 5-% і 30-% січними OB і OG ; для таких діаграм в якості розрахункового навантаження P_Q приймається точка їх перетину Q з 5-% січною OB : $P_Q \rightarrow Q$, рис. 2.123. Цей тип діаграм для сучасних конструкційних металевих матеріалів є основним, він відповідає квазікрихкому руйнуванню.

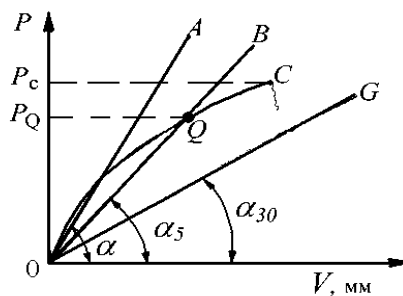


Рис. 2.123 Крива розкриття тріщини за квазікрихкого руйнування

Четвертий тип характерний для діаграм тонколистових пластичних матеріалів і свідчить про в'язке руйнування, рис. 2.124. Для таких діаграм P_Q і K_Q визначити не можна, тому що неправильно обрана товщина зразка та апарат лінійної механіки руйнування в даному випадку не працює. Точка переходу від стабільного до нестабільного розвитку тріщини (точка F) виходить за межі 30% січної, і в цьому випадку можна визначити тільки достовірні значення характеристик нелінійної механіки руйнування.

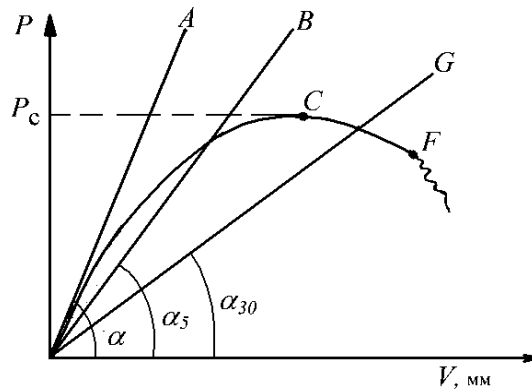


Рис. 2.124 Крива розкриття тріщини при в'язкому руйнуванні

На рис. 2.125 проілюстровано схему практичної побудови січних для апаратурно записаної кривої розкриття тріщини. Насамперед до кривої з початку координат проводиться дотична OA прийнятної довжини; далі з т. A проводиться нормаль AE до осі абсцис, на якій від т. A відкладається два відрізки: $AB=0,05AE$ та $AG=0,30AE$. З'єднуючи точку O з точками B і G отримуємо 5- % і 30- % січні OB і OG .

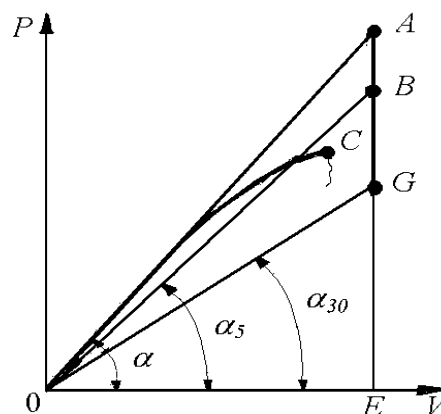


Рис. 2.125 Схема побудови 5 % і 30 % січних

2.5.3 Експериментальне визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} та J -інтеграла Черепанова-Райса

Визначення K_{IC}

Розглянемо умови, які априорі повинні виконуватись при визначенні K_{IC} та реалізація яких забезпечує можливість коректного в рамках лінійної механіки руйнування визначення цієї характеристики.

По-перше, зона пластичної деформації у вершині тріщини у зразку при визначенні K_{IC} має бути набагато меншою за товщину зразка (на 2-3 порядки), рис. 2.126; тобто має виконуватися нерівність:

$$r_p \cdot 10^2 < B,$$

де r_p – радіус зони пластичної деформації, а B - товщина зразка (характерний розмір).

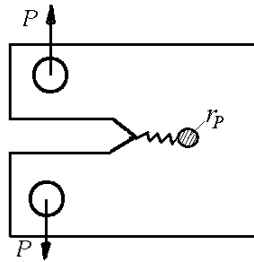


Рис. 2.126 Схема компактного зразка із зоною пластичності у вістрі тріщини

По-друге, до проведення випробувань дослідник повинен мати формули, які описують зв'язок між K_Q , розмірами тріщини, розмірами зразка та розрахунковими навантаженнями, що діють у зразку. Для компактних зразків це формули (2.17), а для зразків IV типу – формули (2.18). Необхідно відзначити, що у стандартах та довідниках наводяться відповідні формули і для зразків іншої конструкції; в іншому випадку їх необхідно виводити, спираючись на апарат лінійної механіки руйнування.

По-третє, у процесі руйнування зразка при його навантаженні повинна апаратурно записуватися діаграма розкриття тріщини в координатах «навантаження – розкриття тріщини», що використовується для визначення P_Q , рис. 2.119.

Порядок визначення K_{IC}

При визначенні K_{IC} здійснюються наступні етапи [17, 37]:

- виготовляються зразки для випробувань на розтяг (визначення $\sigma_T(\sigma_{0,2})$) та зразки для динамічного визначення модуля пружності E ;
- проводять випробування на розтяг і визначають $\sigma_T(\sigma_{0,2})$;
- визначають динамічним методом модуль пружності E за поперечних резонансних коливань;

– за співвідношенням σ_T / E визначають B_{\min} з використанням таблиці 2.1;

Таблиця 2.1 Мінімальна товщина зразка

σ_T / E	до 0,0050	0,0050- 0,0057	0,0057- 0,0062	0,0062- 0,0065	0,0065- 0,0071	0,0071- 0,0080	0,0080- 0,0095	0,0095
B_{\min} , мм	100,0	75,0	63,0	50,0	38,0	25,0	12,0	6,0

– залежно від B_{\min} розраховують решту розмірів зразка (компактного або триточкового);

– виготовляють зразки для випробувань на тріщиностійкість;

– вирощують втомну тріщину ($N \geq 5 \cdot 10^4$ цикл, $\sigma_{a(\max)} \approx 0,5\sigma_T(\sigma_{0,2})$; $r_\sigma = 0,1 \dots 0,2$ (I, III, IV); і $r_\sigma = -1$ (II)); для вимірювання довжини тріщини використовують інструментальний мікроскоп; відповідно до нормативних документів її довжина $l \approx 1,25$ мм;

– зразок з вирощеною втомною тріщиною встановлюється в захвати випробувальної машини для визначення P_Q , кріпляться тензорезисторні перетворювачі сили та переміщень на зразку, монтується ланцюг вимірювань;

– проводяться випробування, руйнується зразок та записується діаграма в координатах $P - V$;

– обробляється діаграма та визначається P_Q (будуємо дотичну, 5 -% і 30 -% січних; визначають ординату т. С з записом $P_Q = P_C$), рис. 2.127.

– визначають K_Q з використанням рівнянь (2.17), (2.18) для компактних СТ і ЗРВ зразків;

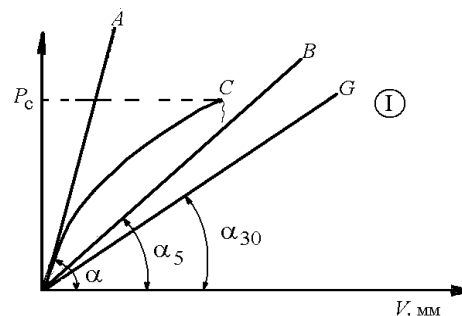


Рис. 2.127 Робоча діаграма розкриття тріщини

– виконують ідентифікацію K_Q (K_c або K_{Ic}) за характером зламу, рис. 2.128, та з використанням формул, які дозволяють ідентифікувати K_Q :

$$\text{якщо} \quad B_{\min} > \alpha \left(\frac{K_Q}{\sigma_{T(0,2)}} \right)^2 \rightarrow \text{ПДС} \Rightarrow K_{Ic}; \quad (2.19)$$

$$B_{\min} < \alpha \left(\frac{K_Q}{\sigma_{T(0,2)}} \right)^2 \rightarrow \text{ПНС} \Rightarrow K_c; \quad (2.20)$$

де α – встановлено дослідним шляхом; ($\alpha = 2,5$ – для сталей, алюмінієвих, титанових та мідних сплавів, тобто. для досить пластичних конструкційних матеріалів, $\alpha = 0,8$ – для матеріалів із низькою пластичністю: чавуни, інструментальні сталі).

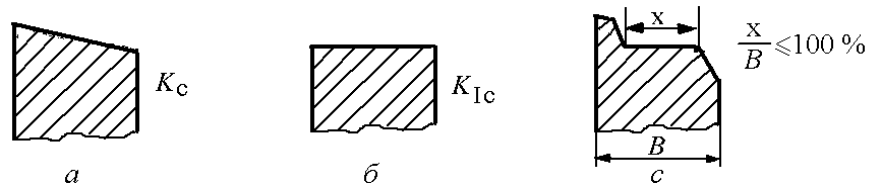


Рис. 2.128 Характер зламу зразків за різних видів руйнування: в'язкий (K_c), крихкий (K_{Ic}), квазікрихкий (K_c або K_{Ic} ?)

Якщо виявилось, що $K_Q = K_c$, необхідно весь цикл випробувань повторити на зразках з більшою товщиною B_{\min} та визначити K_{Ic} .

Визначення J_{Ic} (J_c) – інтеграла Черпанова-Райса

J – інтеграл є енергетичною характеристикою тріщиностійкості та основною характеристикою НЛМР; значення J – інтеграла експериментально визначаються для пластичних матеріалів за малих товщин.

Метод Беглі-Лендіса для визначення J – інтеграла

Як правило, критичне значення J – інтеграла визначається за допомогою R -кривої (кривої опору розвитку тріщини, яка отримала свою назву від англійського слова **Resistance** - опір) багатозразковим методом. Цей метод має ряд переваг перед одноразовими методами визначення J – інтеграла за точністю, адекватністю та відтворюваністю результатів. Він ґрунтується на даних випробувань 10-15 зразків і називається на ім'я його авторів - методом Беглі-Лендіса.

Нагадаємо, що R -крива описує залежність між величиною просування тріщини Δa та значеннями J – інтеграла – питомою енергією просування тріщини на одиницю довжини, рис. 2.129.

Критичне значення J – інтеграла відповідно до методу Беглі-Лендіса визначається як ордината перетину R – кривої та лінії затуплення, яка описується рівнянням

$$J = 2\sigma_f \Delta a,$$

$$\text{де } \sigma_f = \frac{\sigma_{T(0,2)} + \sigma_\epsilon}{2} .$$

$$J = (\sigma_T + \sigma_\epsilon) \Delta a . \quad (2.21)$$

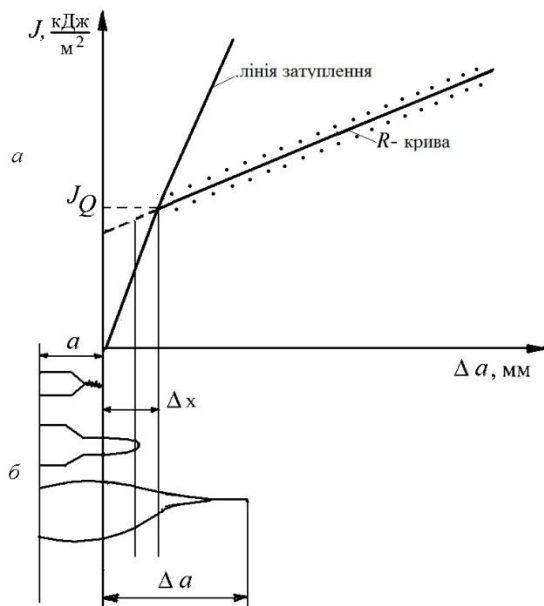


Рис. 2.129 Схема визначення критичного значення J -інтеграла Черепанова-Райса (а) та етапи підростання тріщини (б)

При величині приросту тріщини, менше Δx , рис. 2.129б, її ріст відбувається за рахунок затуплення; і тільки за $\Delta a = \Delta x$ тріщина стартує, розкривається і підростає у відповідності з традиційним механізмом.

Порядок визначення j -інтеграла за стандартами [17, 37]:

- виготовлення зразків для випробувань на розтяг;
- проведення випробувань на розтяг та визначення σ_T ($\sigma_{0,2}$) і σ_ϵ ;
- складання рівняння лінії затуплення (2.21) та нанесення лінії затуплення на графік;
- виготовлення з матеріалу наявної товщини 10-15 зразків для випробувань на тріщиностійкість (наприклад, СТ або ЗРВ);
- вирощування втомної тріщини з урахуванням вимог до цієї тріщини;
- встановлення одного зразка у захвати випробувальної машини, монтування вимірної схеми, підключення її до двокоординатного самописця (ПК) та проведення випробування зразка до руйнування із записом діаграми в координатах $P - V$, рис. 2.130. З використанням цієї діаграми призначається величина просування тріщини Δa_n для всіх 15 зразків за значеннями V_n ; $V_n \rightarrow \Delta a_n$.

Встановлення значення Δa_n для партії зразків:

$$\Delta a_1 \rightarrow V_1 = 0,95 V_c ,$$

$$\begin{aligned}
 \Delta a_2 &\rightarrow V_2 = 0,90 V_c, \\
 \Delta a_3 &\rightarrow V_3 = 0,85 V_c, \\
 (\Delta a_n \text{ через } 0,05 V_c), \\
 \Delta a_{15} &\rightarrow V_{15} = 0,25 V_c.
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

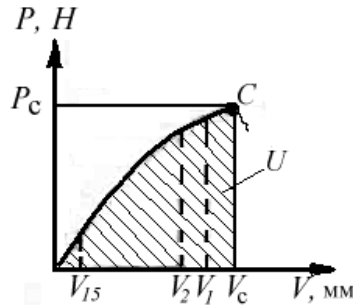


Рис. 2.130 Діаграма розкриття тріщини до руйнування зразка: U – повна робота руйнування зразка – площа діаграми

– почергове випробування 15 зразків без доведення до руйнування; при цьому кожен зразок навантажується наосліп до просування тріщини на відповідну величину Δa_n із записом кривих розкриття тріщини та визначення значень P_n і V_n із занесенням до таблиці 3 (де n – кількість зразків, V_n – зміщення берегів надрізу, яке задається для кожного зразка із запланованим $\Delta a_n = f(V_n)$, а P_n – максимальне навантаження для кожного зразка); в табл. 2.2 також заносяться значення повної енергії U_n просування тріщин на Δa_n (2.23), що визначаються для кожного зразка за діаграмами розкриття тріщин, та значення j -інтеграла J_n , що розраховуються за співвідношенням (2.24):

$$U_n = \frac{P_n \cdot V_n}{2}, \tag{2.23}$$

$$J_n = \frac{2U_n}{B(W-a)}; \tag{2.24}$$

Таблиця 2.2 Фіксація розрахунково-експериментальних параметрів

n	V_n , мм (задаєм)	P_n (знімаємо)	U_n (розрах.)	J_n (розрах.)	Δa_n (знімаємо)
1	V_1	P_1	U_1	J_1	Δa_1
2	V_2	P_2	U_2	J_2	Δa_2
3	V_3	P_3	U_3	J_3	Δa_3
·					
·					
·					
15	V_{15}	P_{15}	U_{15}	J_{15}	Δa_{15}

– далі для побудови R – кривої необхідно визначити дійсну величину Δa_n для кожного зразка, задану наосліп V_n без доведення зразків до руйнування; визначення дійсних значень Δa_n проводиться після руйнування (доламу) зразків із зафіксованою довжиною тріщини; для фіксації просунутої наосліп довжини тріщини в незруйнованих зразках перед їх доламуванням використовується два методи:

– метод температурного фарбування (зразок нагрівається до температури 500-600 °С), в результаті якого відкриті поверхні в перерізі зразка і тріщини забарвлюються в синій колір, рис. 2.131а (у цьому перерізі всі поверхні, крім зони долому 4 забарвлюються в синій колір);

– метод міток, відповідно до якого мітка, що фіксує межу просунутої тріщини, вирощується як тріщина втоми при невеликій амплітуді циклу навантажень; поверхні просунутої тріщини та зони долому мають зернистий злам, а поверхня мітки – притертий блискучий злам, який чітко обмежує зону просунутої тріщини., рис. 2.131б;

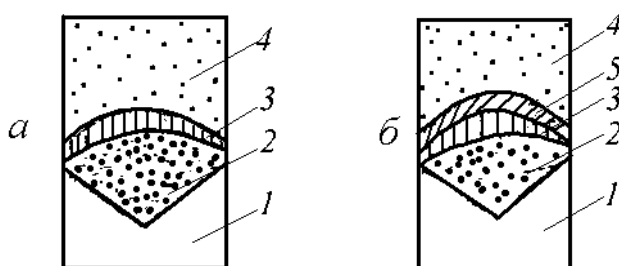


Рис. 2.131 Переріз зразків у зоні долому з фіксацією довжини тріщини методом температурного фарбування (а) та методом міток (б): 1 – зона надрізу; 2 – зона втоми тріщини; 3 – зона просунутої всліпу тріщини на Δa ; 4 – зона долому; 5 – втоми зона методу міток

– просунута тріщина, межа якої зафіксована методом фарбування або міток, обмірюється після розламу зразка, рис. 2.132;

– визначення середньої довжини просунутої наосліп для всіх 15 зразків тріщини Δa_n виконується по зламу відповідно до стандарту ГОСТ 25.506-85 у 5-ти перерізах на інструментальному мікроскопі, рис. 2.132:

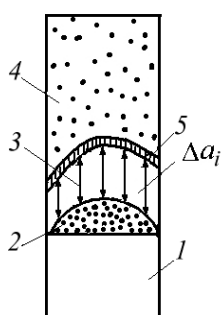


Рис. 2.132 Переріз зразка з тріщиною після долому: 1 – надріз; 2 – втоми тріщина; 3 – наосліп просунута тріщина; 4 – зона долому зразка; 5 – втоми тріщина, нанесена методом міток

$$\Delta a_n = \frac{\sum_i^5 \Delta a_i}{5}, \quad (2.25)$$

де Δa_i – розмір просунутої тріщини в i -тому перерізі, Δa_n – середня довжина тріщини для n -го зразка, значення якої заносяться в табл. 2.3 для всіх n зразків;

– всі значення Δa_n і J_n із табл. 3 наносяться на графік, для отримання R -кривої, рис. 2.133; тут же нанесена лінія затуПЛення у відповідності з її рівнянням (2.21): $J = 2\sigma_f \Delta a$;

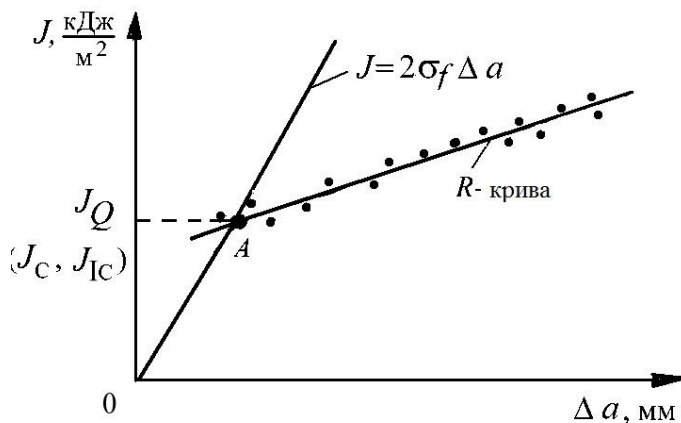


Рис. 2.133 Схема побудови R -кривої

– ордината точки А перетину R -кривої і лінії затуПЛення визначає критичне значення J – інтеграла J_Q ;

– після визначення значення J_Q , ідентифікується вид напружено-деформованого стану та характер J_Q , з використанням наступних співвідношень:

якщо $B_{\min} > \beta \left(\frac{J_Q}{\sigma_{T(0,2)}} \right)$, то $J_Q = J_{IC}$ – розвиток тріщини відбувався в умовах ПДС (плоский деформований стан);

якщо $B_{\min} < \beta \left(\frac{J_Q}{\sigma_{T(0,2)}} \right)$, то $J_Q = J_c$ – розвиток тріщини відбувався в умовах ПНС (плоского напруженого стану);

– відповідно до рекомендацій нормативних документів приймається $\beta = 25 \div 50$.

Зв'язок між силовими K_{IC}, K_c та енергетичними J_{IC}, J_c показниками тріщиностійкості описується співвідношеннями:

$$K_{IC}^* = \sqrt{\frac{J_{IC} \cdot E}{1 - \mu^2}} \quad \text{за ПДС} \quad (2.26)$$

$$K_c^* = \sqrt{J_c \cdot E} \quad \text{за ПНС}, \quad (2.27)$$

де E – модуль пружності першого роду, а μ – коефіцієнт Пуассона.

Слід зазначити, що у довідковій літературі критичні значення коефіцієнтів інтенсивності напружень, визначені з використанням співвідношень (2.26) та (2.27), позначаються зірочкою (*) K_{Ic}^* и K_c^* .

Лекція 2. Планування експерименту

Лекція 3. Сучасні експериментальні комплекси для проведення випробувань

Лекція 4. Методи визначення характеристик міцності, пластичності і пружності за розтягу

Лекція 5. Методи визначення характеристик міцності і пластичності при випробуваннях на короткочасний розтяг

Лекція 6. Методи визначення характеристик міцності, пластичності і пружності за стиску, згину

Лекція 7. Методи визначення характеристик зсуву за кручення

Лекція 8. Випробування на повзучість і довготривалу міцність, визначення границь повзучості і довготривалої міцності для баз 50–10000 годин

Лекція 9. Випробування на втоми, повна крива втоми, узагальнені діаграми втоми

Лекція 10. Випробування за складного напруженого стану

Лекція 11. Визначення характеристик в'язкості руйнування

Лекція 12. Визначення характеристик в'язкості руйнування (продовження)

Контрольні запитання за розділом 2

1. Якими величинами оперують під час планування експерименту та порядок визначення об'єму експерименту?
2. Які плани використовують при однофакторному та багатфакторному експерименті?
3. Які є факторні плани та обмеження для використання планів?
4. Які зразки використовують для випробувань на розтяг?
5. Які механічні характеристики визначаються під час розтягу?
6. Як визначається границя пружності за розтягу?
7. Як визначається умовна та фізична границя плинності за розтягу?

8. Як визначається границя міцності за розтягу?
9. Які характеристики пластичності визначаються за розтягу?
10. Як відбуваються випробування на стиск та їх особливості? Навести діаграми деформування при стисканні.
11. Які механічні характеристики визначаються за випробувань на стиск?
12. Які особливості випробувань зразків із неметалевих матеріалів на стиск?
13. Особливості випробування на розтяг зразків при динамічному навантаженні.
14. Випробування на кручення та їх особливості (кола Мора, розподіл напружень по перерізу).
15. Який характер руйнування за кручення?
16. Випробування на згин та характеристики, що визначаються.
17. Як відбуваються випробування на ударну в'язкість, які є фактори зкрихчення матеріалу, які характеристики визначаються та які зразки?
18. Дати визначення втоми; повна крива втоми.
19. Які є показники форми циклу? Що таке коефіцієнт асиметрії циклу, які бувають режими циклічного навантаження?
20. Чинники, що впливають на втому матеріалів?
21. Узагальнена діаграма втоми.
22. Порядок проведення випробувань на повзучість.
23. Дати визначення тривалої міцності; бази випробувань, криві тривалої міцності та зразки.
24. Дати визначення характеристик пружності; їх розмірність; запис закону Гука.
25. Динамічні методи визначення показників пружності.
26. Види обладнання для випробувань за складного напруженого стану.
27. Зразки для випробувань за складного напруженого стану.
28. Лінійна механіка руйнування, нелінійна механіка руйнування. Класифікація показників тріщиностійкості. Моди тріщин.
29. Параметри та критерії тріщиностійкості.
30. Типи зразків для визначення в'язкості руйнування.

3. СИСТЕМИ СИЛОНАВАНТАЖЕННЯ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Класифікація систем силонавантаження обладнання для визначення механічних характеристик металів і сплавів

Системи силонавантаження призначені для створення робочого навантаження заданого значення і передачі його до об'єкта дослідження за певним законом. У цих системах відбувається перетворення підведеної ззовні електричної енергії в роботу, що витрачається на деформування і руйнування об'єкта дослідження, його переміщення у процесі випробувань та подолання опору середовища.

В якості виконавчих органів в установках із замкнутим контуром регулювання використовуються системи силонавантаження машин, які серійно випускаються промисловістю для механічних випробувань або навантажувальні пристрої індивідуального виробництва.

Розглянемо принципові схеми машин і навантажувальних пристроїв відповідно до їх класифікації за видами випробувань та принципом дії. При цьому розглянемо відомі типи машин незалежно від того, чи вони можуть ефективно використовуватися в автоматизованих системах для випробувань.

Відповідно до характеру навантаження та прийнятої класифікації методів експериментальних досліджень системи силонавантаження можна розділити на **п'ять груп**.

До першої групи можуть бути віднесені системи силонавантаження машин для статичних випробувань на короткочасну міцність при швидкостях деформування від 10^{-9} до 5 мм/с. Залежно від типу перетворювачів, що використовуються для перетворення електричної енергії в механічну роботу, яка витрачається на деформування та руйнування зразка, системи силонавантаження цих машин можна розділити на такі підгрупи: з механічним приводом; з гідравлічними перетворювачами; з гідромеханічним приводом.

При випробуваннях на короткочасну міцність забезпечується безперервна плавна зміна навантаження від нуля до заданого значення в режимі м'якого або жорсткого навантаження. При жорсткому навантаженні контрольованим параметром є переміщення (деформація), а м'якому – навантаження (напруження). Системи силонавантаження з електрогідравлічними розподільниками та гідромеханічним приводом забезпечують м'яке та жорстке навантаження, з гідравлічними перетворювачами прямої дії – тільки м'яке та з меха-

нічним приводом – тільки жорстке. Тому системи перших двох типів є більш універсальними і характеризуються ширшими технічними можливостями.

Так, весь діапазон швидкостей деформування, притаманних статичним випробуванням на короткочасну міцність складає (10^{-9} – 5 мм/с), реалізується лише за використання систем з електрогідравлічними розподільниками. Силованавантажувальні пристрої інших типів дозволяють змінювати швидкість деформування не більше ніж у межах чотирьох порядків.

Діапазон швидкостей навантаження, що реалізуються на машинах з електрогідравлічними розподільниками, не перевищує восьми порядків і практично становить 10^{-2} – 10^6 Н/с.

До другої групи відносяться навантажувальні пристрої для випробувань на повзучість, тривалу міцність та релаксацію напружень. В установках для випробувань на повзучість і тривалу міцність використовуються механічні навантажувальні пристрої трьох типів: з безпосереднім навантаженням зразків вантажами, з системою важільного навантаження, з пружинним навантаженням.

Установки для тривалих статичних випробувань є найпростішими з усіх відомих типів установок. Автоматизація керування їх навантаженням забезпечується за допомогою нескладних електроконтактних пристроїв та електромеханічного приводу. Простота та висока надійність функціонування систем силованавантаження в цих установках забезпечують проведення безперервних випробувань на тривалу міцність та повзучість тривалістю від кількох десятків до 200 000 год (23 роки).

У процесі випробувань у зразках підтримується постійне зусилля. Для забезпечення сталості напружень використовуються спеціальні пристрої, за допомогою яких пропорційно зменшенню площі поперечного перерізу зразка при пластичному деформуванні зменшується плече вантажного важеля або вага вантажу. Випробування за постійного напруження є обмеженими, тому що за таких умов матеріал реальних елементів конструкцій майже не працює. Отримані за такого навантаження криві повзучості металів не містять третьої ділянки, процес повзучості носить згасаючий характер і завершується повним руйнуванням. Тому для випробувань на тривалу міцність застосовується схема з постійним навантаженням.

При релаксаційних випробуваннях повна деформація зразка підтримується постійною та відбувається безперервне зменшення напружень. Такий режим навантаження може забезпечуватися установками двох типів:

- із замкнутим силовим контуром;
- із системою компенсаційного розвантаження.

Релаксаційні установки цих типів дозволяють досліджувати релаксацію напружень у стрижневих суцільних або трубчастих зразках при лінійному однорідному та плоскому напруженому стані. Самостійний інтерес представляє метод випробувань на релаксацію, відомий як метод Одинга. Він заснований на використанні розрізних кільцевих зразків рівного опору згину. Навантаження таких зразків проводиться за допомогою клина, що вставляється з натягом у проріз. Релаксація напружень при згинанні в цьому випадку може досліджуватися так само, як і при використанні пристроїв із замкнутим силовим контуром (коли зменшення напружень зумовлюється перерозподілом деформації між пружною та пластичною складовими в замкнутій системі (клин – зразок) або установок компенсаційного типу (коли зменшення напружень досягається внаслідок періодичного розвантаження кільцевого зразка).

До третьої групи відносяться системи силованавантаження копрів і установок для динамічних випробувань, що забезпечують швидкості деформування від 5 мм/с до 1000 м/с і більше. Залежно від способу збудження динамічних навантажень їх можна розділити на такі підгрупи:

- з гідравлічними перетворювачами;
- з пневматичними перетворювачами;
- з магнітоімпульсними перетворювачами;
- з гравітаційно-маятниковими пристроями;
- з ротаційними перетворювачами;
- з гравітаційними пристроями;
- із пневмопороховими пристроями.

Залежно від характеру зміни напружень розглядають два види динамічного навантаження – швидкісне та імпульсне (ударне).

Швидкісне навантаження реалізується при швидкостях деформування не більше 25 м/с на маятникових, електрогідравлічних та пневматичних установках, які забезпечують розгін тіла до необхідної швидкості деформування. При такому навантаженні напруження в об'єкті дослідження збільшуються плавно від нуля до кінцевого значення і в цьому випадку хвильові явища можуть не враховуватися.

При **імпульсному (ударному) навантаженні** напруження в об'єкті дослідження зростають практично миттєво за рахунок гальмування, що попередньо розганяється до високої швидкості тіла (5 – 1000 м/с). У цьому випадку використовуються:

- кінетична енергія вантажу, що падає,
- потенційна енергія стисненого газу,
- енергія вибуху

- енергія електромагнітного поля.

У зв'язку з тим що при одноразовому імпульсному навантаженні руйнування відбувається протягом дуже малого інтервалу часу тривалістю від декількох часток мікросекунди до декількох мілісекунд, при таких випробуваннях необхідно враховувати хвильові явища у зразку та ланцюги навантаження, радіальну інерцію матеріалу та інші ефекти, що обумовлюють неоднорідність деформованого стану зразка і порушують заданий закон деформування.

Динамічні випробування в залежності від прийнятої схеми силозбудження проводять у режимі м'якого або жорсткого навантаження. При імпульсному прикладенні навантаження методично простіше реалізувати жорсткий режим, у якому забезпечується сталість швидкості деформації з допомогою ударного навантаження зразка бойком. У цьому випадку енергія імпульсу повинна бути набагато більшою за роботу руйнування зразка, щоб забезпечити при навантаженні сталість швидкості переміщення бойка і швидкості деформування зразка. М'який режим навантаження, при якому забезпечується постійність швидкості зміни напружень за імпульсних випробувань можна здійснити, якщо удар по зразку наносити масивним вантажем через спеціальний хвилевід. Випробування при швидкісному деформуванні можуть проводитися в жорсткому і м'якому режимах. Очевидно, що при дослідженні швидкісних залежностей характеристик міцності та пластичності матеріалів необхідно задавати такі режими навантаження та використовувати такі схеми силозбудження, які забезпечували б однорідність напружено-деформованого стану на робочій ділянці зразка та сумісність результатів, отриманих при високошвидкісному навантаженні з результатами статичних випробувань на короткочасну міцність

До четвертої групи відносяться системи силованаантаження машин та установок для випробувань на втому та демпфування. В даний час використовуються дуже різноманітні типи таких систем, засновані на збудженні механічних коливань за рахунок перетворення енергії обертового руху твердих тіл, енергії стисненої рідини або газу, електромагнітної енергії та інших видів енергії в роботу, що витрачається на переміщення та деформування об'єктів дослідження. Вони забезпечують збудження циклічних навантажень у широкому діапазоні частот навантаження (від $3 \cdot 10^{-4}$ Гц до 100 кГц), коефіцієнтів асиметрії циклу (від +1 до -1 з переходом через $\pm \infty$, -1 і 0) і амплітуд деформацій або напружень при регулярному і програмованому навантаженні. Ці системи відрізняються за типом перетворювачів (збудників), що використовуються для перетворення електричної енергії, яка підводиться від джерела живлення, в енергію коливального руху твердих тіл, і в залежності

від принципу збудження циклічних навантажень і типу використаних збудників вони можуть бути розділені на такі підгрупи:

- з механічними збудниками;
- з інерційними збудниками;
- з гідравлічними перетворювачами;
- з пневматичними перетворювачами;
- з електромагнітними перетворювачами;
- з електродинамічними перетворювачами;
- з магнітострикційними перетворювачами;
- з п'єзоелектричними перетворювачами.

У загальному випадку при випробуваннях на втому реалізується м'який або жорсткий режим навантаження; за м'якого забезпечується сталість амплітуд навантаження (напруження) і контрольованим параметром є їх величина, а за жорсткого – амплітуди переміщення (деформації).

При порівняно невисоких частотах навантаження (0-50 Гц) найбільшою універсальністю характеризуються гідравлічні машини з електрогідравлічними розподільниками, що дозволяють проводити випробування в умовах м'якого і жорсткого навантаження при практично будь-якій формі циклу з асиметрією, що змінюються за будь-яким заданим законом асиметрії і амплітудою. На машинах такого типу, оснащених системами автоматичної обробки та управління, можна отримувати жорсткий режим навантаження не тільки за постійної амплітуди повної деформації, а й за підтримки сталості амплітуди її пластичної складової, яка визначається в процесі експерименту.

До п'ятої групи можна умовно віднести всі інші системи силованавантаження, не віднесені до перших чотирьох груп. Вони характеризуються відсутністю складних проміжних перетворювачів і призначені для використання в різних стендах для випробування елементів конструкцій та їх моделей в умовах, що близько відповідають реальним умовам експлуатації. Такі умови реалізуються за допомогою стендів для дослідження несівної здатності дисків, що швидко обертаються, при частоті обертання до 70000 об/хв, стендів для дослідження міцності посудин і трубопроводів при зовнішньому або внутрішньому тиску, стендів для дослідження несівної здатності і довговічності різних елементів конструкцій у високотемпературних газових потоках, стендів та установок для дослідження термоутими матеріалів і т. д. Якщо до перших чотирьох груп віднесені системи силованавантаження, що розвивають та передають до об'єктів дослідження зосереджені та розподілені поверхневі або масові навантаження за рахунок перетворення різних видів енергії в механічну роботу за допомогою оформлених у вигляді компактних пристроїв перетворювачів, то до п'ятої групи віднесені системи, які забезпечують збудження

напружень в об'єктах дослідження шляхом безпосереднього впливу на ці об'єкти теплових, силових, електромагнітних полів або їх безпосереднього навантаження газоподібними чи рідинними енергоносіями.

Таким чином, у розглянутій класифікації враховані всі типи систем силованавантаження, які використовуються в установках для дослідження закономірностей деформування та руйнування матеріалів та визначення їх характеристик міцності, пластичності, тріщиностійкості та пружності. Ці системи силованавантаження дозволяють здійснювати постановку макроексперименту і вивчати зв'язок між деформаціями і напруженнями в твердому тілі при пружному і пружнопластичному деформуванні в широкому інтервалі швидкостей деформування і навантаження (10^{-9} мм/с - 1000 м/с), в широкому частотному інтервалі ($3 \cdot 10^{-4}$ – 10^5 Гц), в режимах м'якого і жорсткого навантаження, при відтворенні будь-якого характеру впливу зовнішніх навантажень різної природи, в умовах лінійного та складного напружених станів, за розтягу - стиску, кручення та згину.

3.2 Машини для статичних випробувань

3.2.1 Машини з механічним приводом

Машини з механічним приводом застосовуються при випробуваннях на короткочасну міцність та малоциклову втому. Вони забезпечують збудження статичних або повторно-статичних навантажень з невеликою частотою. Використані в таких машинах черв'ячно-гвинтові механічні перетворювачі, привід яких здійснюється від електродвигуна змінного або постійного струму через систему механічних передач, дозволяють отримувати швидкості переміщення активного захвату не більше 100 мм/хв і проводити випробування тільки в жорсткому режимі навантаження. При повторно-статичних тривалих випробуваннях таким швидкостям деформування відповідають частоти навантаження трохи більше 5 цикл/хв.

Типова схема машини з механічним перетворювачем показана на рис.3.1а. Обертання від реверсивного двигуна змінного струму 1 через клиноперемінну передачу 2 і коробку передач 3 передається до черв'ячного редуктора 4. У ступиці черв'ячного колеса виконано отвір з силовою різьбою в якій переміщається вантажний гвинт 5, виготовлений заодно з рухомим захватом зразка. При обертанні колеса гвинт переміщається тільки у вертикальній площині, передаючи навантаження до зразка 6. Така схема навантаження застосовується в машинах серії УМЕ-10Т з граничним зусиллям 0,1 МН. Зміна швидкості деформування зразка в цих машинах здійснюється за-

вдяки застосуванню коробки передач зі ступінчасто регульованою частотою обертання вихідного валу; забезпечується таке співвідношення чисел обертів вихідного валу до вхідного: 1:1, 1:10, 1:100, 1:1000, 1:10000, якому відповідає діапазон швидкостей від 0,005 до 100 мм/хв. Знак навантаження під час статичних та циклічних випробувань змінюється за рахунок реверсування вихідного валу електродвигуна по команді від системи управління.

Безступінчасте регулювання швидкості переміщення активного захвату в деяких машинах забезпечується завдяки використанню двигунів постійного струму, кутову швидкість яких можна плавно змінювати за допомогою тиристорного блоку.

У машинах із розглянутою системою навантаження використовується однозонний контур силового замикання (див. рис. 3.1а).

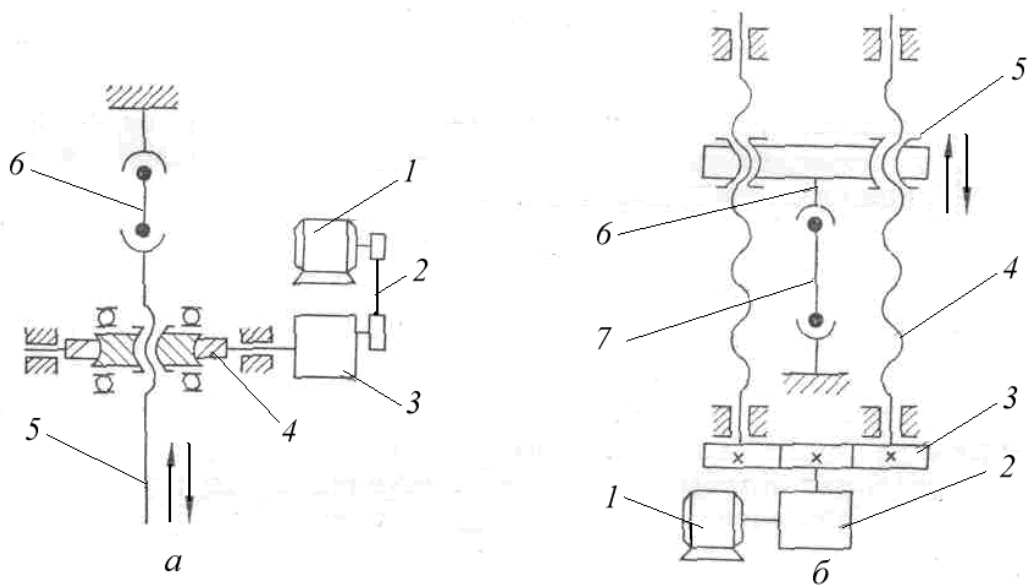


Рис. 3.1 Схеми системи силованавантаження з механічним приводом
а – з рухомим вантажним гвинтом, б – нерухомим вантажним гвинтом

Досить широке поширення для випробувань за статичного і повторно-статичного навантаження отримали останнім часом двозонні машини (див. рис. 3.1б), в яких основними елементами механічного перетворювача служать вантажні гвинти і рухома траверса.

Схема системи силованавантаження вітчизняних машин серії *P* такого типу показана на рис. 3.1б. Навантаження прикладається до зразка 7 через активний захват б від рухомої траверси 5, яка переміщується у вертикальній площині при обертанні вантажних гвинтів 4. Привід вантажних гвинтів здійснюється від електродвигуна постійного струму 1 через черв'ячний редуктор 2 і шестерний редуктор 3. Частота обертання може плавно безступінчато регулюватися за допомогою системи тиристорного управління, що дозволяє змінювати швидкості руху активного захвату машини від 1 до 100 мм/хв.

Останнім часом промисловістю випускалися машини із двогвинтовою схемою навантаження граничним зусиллям до 50 кН. На таких машинах проводяться випробування на розтяг і стиск за статичного і повторно-статичного навантаження, а також на згин. При цьому може реалізуватися тільки жорсткий режим навантаження з контролем швидкості активного переміщення захвату зразка.

3.2.2 Машини з гідравлічними перетворювачами

Машини з гідравлічними перетворювачами так само, як і машини з механічним приводом, використовуються для статичних випробувань на короткочасну міцність та повторно-статичних випробувань. Вони відрізняються дуже широкими технічними можливостями: забезпечують м'який і жорсткий режими навантаження, великі швидкості та великий діапазон переміщення активного захвату (до 20 м/с і 2 м відповідно), широкий діапазон граничних навантажень (від кількох ньютонів до сотень тисяч меганьютонів). Крім того, з використанням гідравлічних перетворювачів можна проводити випробування за тривалого статичного, циклічного та динамічного (швидкісного) навантаження.

У ланцюзі силозбудження гідравлічних машин обов'язкові три основні ланки [23]:

- електромеханогідравлічна, в якій електроенергія живлення трансформується в енергію руху стиснутої рідини;
- гідравлічна, що представляє собою тракт гідропередачі стиснутої рідини до виконавчого органу,
- гідромеханічна, в якій енергія стиснутої рідини перетворюється на механічну роботу деформування та руйнування зразка, переміщення та пружного деформування силових елементів ланцюга замикання.

Конструктивно електромеханогідравлічна ланка є електроприводом з насосною установкою; гідравлічна – система трубопроводів з різними клапанами, фільтрами та іншою арматурою; гідромеханічна - гідродвигун або силовий гідроциліндр з поршнем, який через систему захватів жорстко пов'язаний із зразком.

У машинах для статичних випробувань керування потоком стисненої рідини до силового циліндра, тобто управління режимом навантаження, здійснюється в першій або другій ланці. Системи навантаження з управлінням навантаженням на першій ланці відповідно до прийнятої нами класифікації, називаються *системами прямої дії*, а з управлінням на другій ланці, що здійс-

нюється з допомогою електрогідравлічних підсилювачів-перетворювачів дросельного типу, – *системами з електрогідравлічними перетворювачами*.

У **системах прямої дії** для управління рухом рідини використовують регулювання частоти обертання приводу насоса та продуктивності насоса, а також поділ за допомогою гідравлічних пристроїв потоку рідини безпосередньо після її виходу з насоса на дві частини, одна з яких (основна) подається в гідравний тракт, а інша на злив.

У **системах з електрогідравлічними перетворювачами** управління потоком стиснутої рідини здійснюється шляхом її поділу на виході з гідравлічного тракту також на два потоки, один з яких прямує дросельним розподільником у силовий циліндр, а другий на злив.

Типова схема гідравлічної машини з силозбудженням прямої дії показана на рис. 3.2а. Масло з ємності 1 за допомогою насоса 2 з регульованою подачею нагнітається через регулятор витрат 4, фільтр 5 і зворотний клапан 6 по трубопроводу високого тиску 7 в робочий циліндр 8. Переміщення поршня 9 через жорстку раму-реверсор 10 передається рухомому захвату 11 та зразку 12. Гідравлічні машини такого типу забезпечені циліндром простої дії з односторонньою робочою порожниною. Вони можуть створювати навантаження по одному напрямку, для отримання навантаження протилежного знака використовується реверсор.

Розглянута система силозбудження зазвичай компонується із системою замикання, показаної на рис. 3.2а.

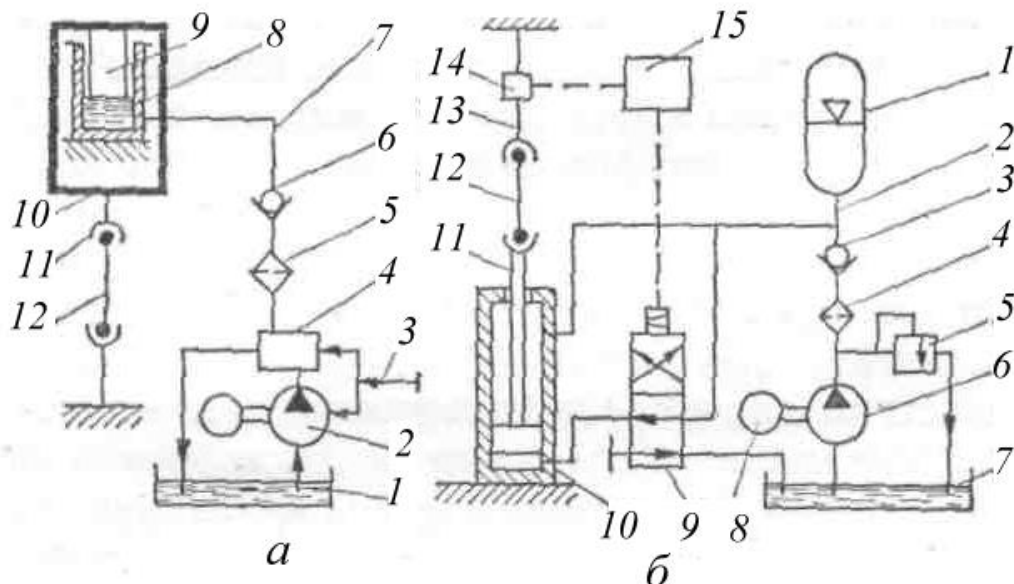


Рис. 3.2 Схеми систем силонавантаження з гідравлічним збудженням:
а - прямої дії, б - з ЕГП

Управління навантаженням у гідравлічних машинах такого типу здійснюється за допомогою регуляторів подачі (продуктивності) регульованих на-

сосів або регуляторів швидкості у поєднанні з вентилями скидання. Регулятори швидкості широко використовуються в системах, укомплектованих насосами з нерегульованою продуктивністю. Машини, розраховані на навантаження більше 1 МН, також забезпечуються стабілізаторами навантажень; основним елементом системи управління зі стабілізацією тиску є прецизійний переливний клапан, налаштування якого дозволяє отримати будь-який рівень стабілізованого тиску в широкому інтервалі значень, а отже і зусилля навантаження, що розвивається системою.

Управління продуктивністю насоса та витратою стисненого масла в системі здійснюється вручну або за допомогою керованого крокового двигуна. При ручному управлінні важіль 3 (рис. 3.2а) пов'язує з регулятором продуктивності і витратою насосної установки таким чином, щоб його певному положенню відповідала певна швидкість подачі масла в гідроциліндр і певна швидкість навантаження зразка.

Розширення технічних можливостей машин для випробувань при статичному навантаженні пов'язане із застосуванням в них гідравлічних систем силозбудження з електрогідравлічними перетворювачами (ЕГП), які дозволяють у досить широкому інтервалі значень варіювати параметри м'якого та жорсткого режимів навантаження та автоматично керувати ходом.

Сучасні установки із замкнутим контуром регулювання засновані на використанні ЕГП, які представляють собою прецизійні електромагнітні золотники складного профілю, виготовлені зі спеціальних нікелевих сплавів із заданими магнітними властивостями, що дозволяють з високою точністю по команді від систем автоматичного управління регулювати подачу масла в активну порожнину силового циліндра. За допомогою ЕГП від насосної установки по гідравлічному тракту потік стисненого під високим тиском масла поділяється на два потоки, один з яких дозовано прямує в гідроциліндр (гідромеханічний перетворювач), забезпечуючи навантаження об'єкта дослідження за заданим законом, а другий потік - на злив. ЕГП встановлюється в системі силозбудження на межі між другою і третьою ланкою, тобто на виході з гідравлічного тракту та на вході в гідромеханічний перетворювач.

Автоматизовані гідравлічні машини для статичних випробувань на короткочасну міцність не призначені для реалізації змінних або швидкісних режимів навантаження, тому для управління силовим циліндром в них застосовують односторонні (несиметричні) електрогідравлічні розподільники, які керують подачею оливи тільки в одну робочу порожнину гідроциліндра. Зазвичай несиметричні ЕГП комплектуються з диференційними циліндрами односторонньої дії, як, наприклад, у машинах серії УЕ. При використанні для випробувань при статичному навантаженні гідросистем з двопорожнинними

симетричними циліндрами та відповідними симетричними електрогідравлічними перетворювачами (які звичайно входять до складу систем для циклічних випробувань) управління здійснюється однією робочою порожниною гідроциліндра: верхній при розтягуванні або нижній при стисненні зразка.

Схема системи силованавантаження гідравлічних машин з ЕГП та диференціальним робочим циліндром показана на рис. 3.2б. Масло під високим тиском подається насосом 6 з електродвигуном 8 з резервуара 7 через фільтр 4, зворотний клапан 3 і ЕГП 9 по трубопроводу 2 в циліндр 10 (перепускний клапан 5 є запобіжним). Поршень зі штоком 11 переміщуючись розтягує або стискає зразок 12. У ланцюзі верхнього нерухомого захвату 13 встановлений датчик сили 14, сигнал якого подається в блок автоматичного управління навантаженням 15 і далі в ЕГП по замкнутому контуру. У аналізованому випадку контрольованим параметром є навантаження отже у процесі випробувань реалізується м'який режим навантаження. Регулювання управління у системах силовбудження з ЕГП також може виконуватися по деформації або переміщенню від датчиків, встановлених у силовому ланцюзі паралельно зразку (на схемі не показані), для забезпечення жорсткого режиму навантаження.

Диференціальний гідроциліндр 10 з одностороннім штоком, який найбільш широко використовується в машинах для статичного та повторно-статичного навантаження, має дві порожнини: пасивну – верхню та активну (робочу) – нижню. Ефективна площа пасивної порожнини істотно менше, ніж активної, і з'єднана безпосередньо з магістраллю стабілізованого живлення від гідроаккумулятора 1. Активна порожнина з'єднана з гідравлічним трактом через ЕГП, як правило закріплюється на циліндрі. Програма навантаження при використанні таких диференціальних циліндрів відпрацьовується за рахунок керування активною порожниною. Якщо тиск активної порожнини зменшується, зразок розтягується; при збільшенні тиску до зразка прикладається стискаюче навантаження. Таким чином, завдяки відмінності робочих площ в активній та пасивній порожнинах гідроциліндра можна при однаковому стабілізованому тиску в пасивній порожнині і на вході в ЕГП отримувати в зразку стискаюче зусилля, а розтяг здійснювати за тиску масла, значно меншого ніж стабілізованого.

Використання симетричних циліндрів з двостороннім штоком здебільшого пов'язане із застосуванням гідравлічної системи силовбудження в машинах для випробувань на втому з ЕГП. Система замикання силового контуру гідравлічних машин з ЕГП однакова та аналогічна представлений на рис. 3.2. Компонування таких машин характеризується нижнім (у п'єдесталі) розташуванням блоку гідроциліндрів і рухливістю верхньої траверси.

Слід підкреслити, що привід верхньої траверси у більшості машин з електрогідравлічними перетворювачами переважно здійснюється від спеціальних гідросистем. Так, у комплексі фірми «Гітротест» обидві колони є штоками поршнів, розміщених у встановлених на траверсі циліндрах. Основний, розміщений у станині, гідроциліндр та циліндри траверси, що запитуються від загальної насосної установки, дозволяють навантажувати зразок при загальному ході до 800 мм. У даному випадку навантаження можна здійснювати незалежно кожним окремо або одночасно двома приводами.

У деяких моделях гідравлічних машин фірми «Інстрон» з ЕГП при статичних випробуваннях навантаження зразка проводиться також за допомогою верхньої траверси, яка переміщується від механічного приводу, виконаного у вигляді черв'ячно-гвинтового механізму та забезпечує швидкість деформування в інтервалі 0,05-500 мм/хв. .

У деяких гідравлічних машинах для статичних випробувань колони використовуються як поршні силових циліндрів, встановлених у п'єдесталі. Поршні колони при навантаженні переміщуються разом із верхньою траверсою, розтягуючи зразок. За такою схемою випускається портативна розривна машина РМ-50 із граничним навантаженням 0,5 МН.

У машинах серії УЕ верхня траверса, жорстко закріплена на двох колонах, також переміщається разом із колонами, які виконують функцію поршнів гідропідйомників. Гідроциліндри розміщені у станині. На відміну від машини типу РМ-50 у машинах серії УЕ ці гідроциліндри є допоміжними і використовуються лише для зміни робочого простору при настановному ході верхнього захвату. Навантаження зразка виробляється від силового циліндра диференційного типу, поршень якого жорстко пов'язаний з нижнім активним захватом зразка.

Більш детально конструкцію основних елементів гідравлічних машин з електрогідравлічними розподільниками та перетворювачами буде розглянуто при ознайомленні з установками для випробувань на втому. На закінчення слід зазначити, що при вивченні тріщиностійкості матеріалів та вивченні особливостей їх крихкого руйнування, тобто при проведенні випробувань, результати яких значною мірою залежать від рівня накопиченої перед руйнуванням зразка в системі зразок-машина пружної енергії, доцільно використовувати системи замикання та силовозбудження, що забезпечують максимальну жорсткість силового контуру. Машини, що задовольняють таким вимогам, повинні мати гідравлічну систему контролюваного за параметром переміщення навантаження, малу податливість деталей силового контуру та мінімальну кількість з'єднань у ланцюгу: зразок - захват - траверса - колони - станина - гідроциліндр з поршнем - захват - зразок. Тому машини цільового приз-

начення для випробувань на тріщиностійкість виконуються з гідравлічними перетворювачами, що забезпечують малі швидкості деформування при жорсткому режимі навантаження, розраховуються на великі граничні навантаження та мале переміщення активного захвату. Ці машини мають незмінні габаритні розміри робочого простору завдяки жорсткій нероз'ємній фіксації силових елементів системи замикання та забезпечені захватами спрощеної конструкції з малою кількістю роз'ємних з'єднань (допускається також приварювання зразка до захвату). З використанням машин підвищеної жорсткості при статичних випробуваннях на короточасну міцність стандартних зразків можна отримувати повні (рівноважні) діаграми деформування та руйнування матеріалів незалежно від рівня їх міцності та пластичності.

3.2.3 Машини із гідромеханічним приводом

Машини цього типу використовуються для проведення випробувань на короточасну міцність при статичному навантаженні та для дослідження міцності та деформативності матеріалів та елементів конструкції при повторно-статичному знакопостійному навантаженні з низькою частотою. Гідромеханічний привід дозволяє реалізувати в процесі випробувань м'який і жорсткий режими зі швидкостями навантаження і деформування $1-5 \cdot 10^4$ Н/с і $1 \cdot 10^{-4} - 5$ мм/с. Ланцюг перетворення електричної енергії живлення, що подається з мережі до привідного електродвигуна складається з чотирьох ланок:

- електромеханогідравлічного перетворювача,
- гідропередачі,
- гідромеханічного перетворювача,
- механічного перетворювача, що надає переміщення активному захвату зразка.

Так само, як і в машинах з гідравлічним приводом, в якості електромеханогідравлічних перетворювачів в машинах застосовуються гідронасоси, а до ланки гідропередачі відносяться трубопроводи високого тиску з різною арматурою. Однак у даному випадку в якості гідромеханічного перетворювача використовується не силовий гідроциліндр, а гідродвигун, який перетворює рух стисненої рідини в обертальний рух, що передається до редуктора механічного перетворювача.

Схема системи силозбудження машин з гідромеханічним приводом показана на рис. 3.3.

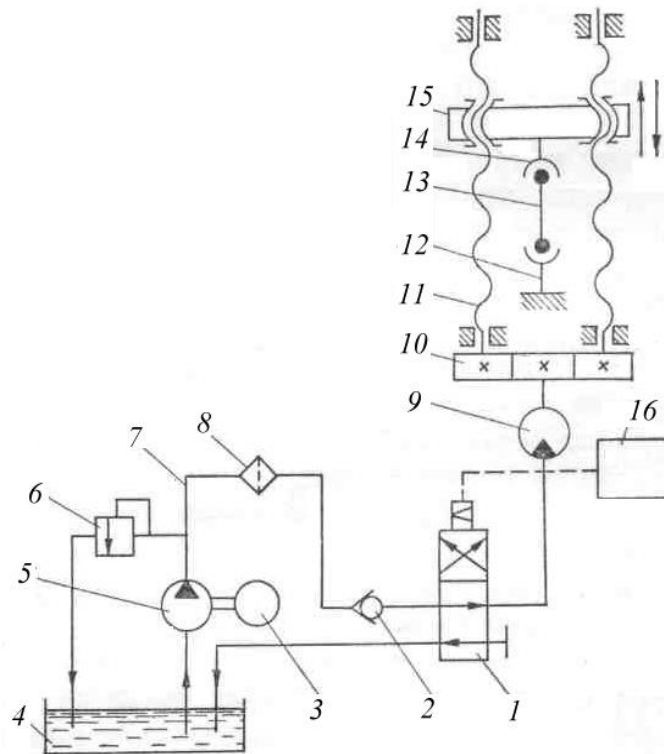


Рис. 3.3 Схема системи навантаження з гідромеханічним приводом

Масло з бака 4 подається насосом 5 з електроприводом 3 по напірному трубопроводу 7 з регулятором тиску 6 через фільтр 8 і клапан 2 до гідродвигуна 9, від вихідного валу якого через редуктор 10 наводяться в обертання симетричні вантажні гвинти 11. Система замикання в цих машинах, як правило, однозонна. Силовий контур замикається через гвинти 11, рухому траверсу 15, захвати 12, 14, зразок 13 і станину. Напрямок обертання гвинтів може змінюватися по команді від блоку управління 16, керуючого роботою гідродвигуна за допомогою сервоклапану 1. Ця система є більш універсальною в порівнянні з чисто механічною. Основна її перевага полягає в тому, що завдяки використанню гідродвигуна вона дозволяє проводити випробування як при жорсткому, так і м'якому навантаженні, управління навантаженням здійснюється на гідромеханічній ланці.

До її переваги в порівнянні з суто гідравлічними системами можна віднести те, що із зони замикання силового контуру машин із гідромеханічним приводом виключені всі елементи гідроапаратури. Тому при проведенні випробувань за умов високих та низьких температур не потрібно передбачати спеціальних конструктивних заходів для захисту гідравлічних комунікацій від теплових потоків.

І в той же час у зв'язку з наявністю в цій системі на останній ланці механічного перетворювача вона значно, на чотири порядки, програє чисто гідравлічним системам у інтервалі швидкостей деформування і навантаження.

Система силованавантаження з гідромеханічним приводом розглянутого типу використана англійської фірмою «Інстрон».

3.3 Особливості випробувань за тривалого статичного навантаження

3.3.1 Випробування за тривалого статичного навантаження

Випробування зразків на повзучість, тривалу міцність і релаксацію напружень проводяться за дії на об'єкт дослідження статичних постійних або повільно змінюваних навантажень. Повзучістю називається властивість металів повільно і безперервно деформуватися в умовах впливу постійного навантаження або напружень, а тривалою міцністю - здатність матеріалів чинити опір руйнуванню при такому навантаженні [2, 36]. Релаксацією напружень називається самовільне зниження напружень у навантаженому твердому тілі при постійній сумарній початковій деформації та постійній температурі [3]. У процесі релаксації разом із зменшенням напружень відбувається безперервна зміна співвідношення між пружною та пластичною складовою сумарної деформації; пружна деформація зменшується, а пластична – збільшується. Початкова деформація реалізується в матеріалі за дуже короткий порівняно з тривалістю випробувань проміжок часу, протягом якого зовнішня зосереджена сила змінюється від нуля до заданого значення, що визначає початковий рівень релаксуючих протягом тривалого часу напружень.

Таким чином, якщо при дослідженні релаксації напружень у процесі випробувань постійно підтримується сумарна деформація зразка, то при випробуваннях на повзучість та тривалу міцність необхідно забезпечувати сталість навантаження чи напружень. Випробування на релаксацію напружень проводяться в умовах розтягу, кручення та згину, на повзучість – в умовах розтягу та згину, на тривалу міцність – практично тільки при розтягу. Зміна напружень та деформацій у зразку при так званій чистій релаксації ($\varepsilon = const$) та повзучості ($P = const$) показані на рис. 3.1а. Якщо врахувати, що в процесі релаксації напружень відбувається повільне і безперервне накопичення пластичної деформації за рахунок зменшення пружної складової, то випробування на релаксацію можна розглядати як окремий випадок випробувань на повзучість при напруженнях, що повільно змінюються. Для систем з обмеженою жорсткістю криві зміни напружень та пластичної деформації (штрихова лінія) займають певне проміжне положення порівняно з граничними

кривими для чистої релаксації та повзучості. Такий характер зміни напружень і деформацій найчастіше має місце у реальних умовах експлуатації.

Схема випробувань за постійної сили або постійної початкової деформації є ідеалізованою і використовується лише за стандартних випробувань зразків. При експлуатації реальних конструкцій, виникаючі в елементах зусилля, можуть повільно змінюватися в часі. Це пов'язано з тим, що навіть при незмінних зовнішніх навантаженнях зусилля, що виникають у сполучених якимось чином деталях, можуть перерозподілятися, якщо ці деталі та елементи є системою з пружнопластичних деформованих ланок. Схема такої найпростішої системи, що складається з двох елементів, один з яких може деформуватися тільки пружно, а другий і пластично і пружно, наведена на рис. 3.1б [36]. Стрижень 1 з'єднаний з пружиною 2, жорсткість якої дорівнює C . У початковий момент часу стрижень продеформований на величину деформації ε_0 , якій відповідає напруження σ_0 завдяки подовженню пружини на σ_0 / C . При подальшій витримці сумарне видовження зразка та пружини буде постійним.

$$\varepsilon + \frac{\sigma}{C} = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0}{C} = const. \quad (3.1)$$

У процесі повзучості стрижня напруження в силовому ланцюгу зменшуються і відбувається релаксація напружень, причому ступінь цієї релаксації залежить від жорсткості пружного елемента. Якщо жорсткість пружини незначна, то зміна її довжини за рахунок зміни довжини стрижня при повзучості може взагалі не впливати на напруження σ_0 . У цьому випадку умови навантаження та деформування відповідатимуть випробуванням на повзучість при $\sigma = const$ (див. рис. 3.4а).

Якщо жорсткість пружини буде настільки велика, що значення σ / C стануть нехтувано малими, пружина не буде деформуватися, довжина зразка залишиться постійною, а $\varepsilon = \varepsilon_0 = const$. Цей випадок відповідає умовам релаксації (див. рис. 3.4а), за яких зменшення напружень в процесі релаксації викликається лише перерозподілом між пластичною $\varepsilon_{пл}$ та пружною $\varepsilon_{пр}$ складовими початкової деформації стрижня:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{пр} + \varepsilon_{пл} = const. \quad (3.2)$$

Загальний випадок, при якому жорсткість пружного стрижня має проміжне значення між двома розглянутими крайніми значеннями, найчастіше має місце в реальних умовах. При цьому повзучість матеріалу стрижня супроводжується зменшенням напружень (штрихова лінія на рис. 3.4а).

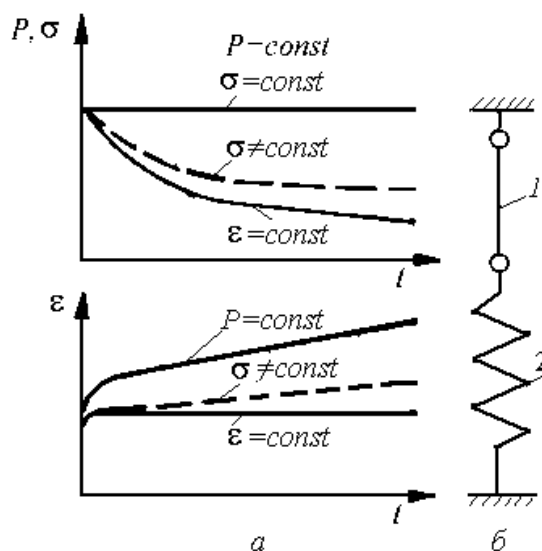


Рис. 3.4 Зміна навантаження, напружень та деформації при випробуваннях на повзучість та релаксацію (а) та схема закріплення стрижня, працюючого на релаксацію (б)

Отже, повзучість і релаксацію напружень у твердих тілах можна розглядати як два явища однакової природи, які проявляються по-різному залежно від умов сполучення деталей у конструкції.

Аналіз історії розробки експериментальних засобів для тривалих статичних випробувань показує, що дослідники завжди прагнули вивчати ці два явища незалежно, щоб забезпечити чистоту і простоту експерименту. Випробувальні пристрої та установки для таких випробувань виконуються таким чином, щоб у якомога чистіших умовах експерименту забезпечити отримання даних про характеристики релаксаційної стійкості, повзучості та тривалої міцності матеріалів. Цій умові при повзучості відповідають випробування із застосуванням схем гравітаційного або важільно-гравітаційного навантаження зразка, що забезпечують постійність навантаження в процесі тривалих випробувань і виключають можливість релаксації напружень у матеріалі.

Умовам чистої релаксації відповідають схеми навантаження, у яких жорсткість пружного елемента має бути нескінченно більшою порівняно з жорсткістю зразка. Реалізація таких схем пов'язана з великими технічними труднощами, і тому в релаксаційних установках, що експлуатуються в даний час, досягнуто лише деяке наближення до умов чистої релаксації.

При випробуваннях на релаксацію фіксують зміну зусилля (напружень) у зразку, при випробуваннях на повзучість вимірюють його деформацію, а при дослідженні тривалої міцності визначають час до руйнування при постійному навантаженні. Характеристики повзучості, тривалої міцності та релаксаційної стійкості матеріалів переважно визначаються при високих температурах. Конструкція електропечей, принципи нагрівання зразків та регу-

лювання їх температури відносяться до спеціальних питань експерименту і тому в цьому розділі не розглядаються.

3.3.2 Пристрої для випробувань на повзучість та тривалу міцність

Системи силонавантаження пристроїв для тривалих статичних випробувань відрізняються надзвичайною простотою. Це пояснюється тим, що випробування на повзучість і тривалу міцність проводяться головним чином за розтягу в умовах лінійного напруженого стану і в процесі цих тривалих випробувань необхідно забезпечувати сталість навантаження, що діє на зразок. Порушення навантажень у цих пристроях здійснюється в основному за допомогою безпосередньо гравітаційних або важільно-гравітаційних систем з пружноравітаційним замиканням силового контуру.

Цим способом збудження відповідають схеми навантаження, наведені на рис. 3.5.

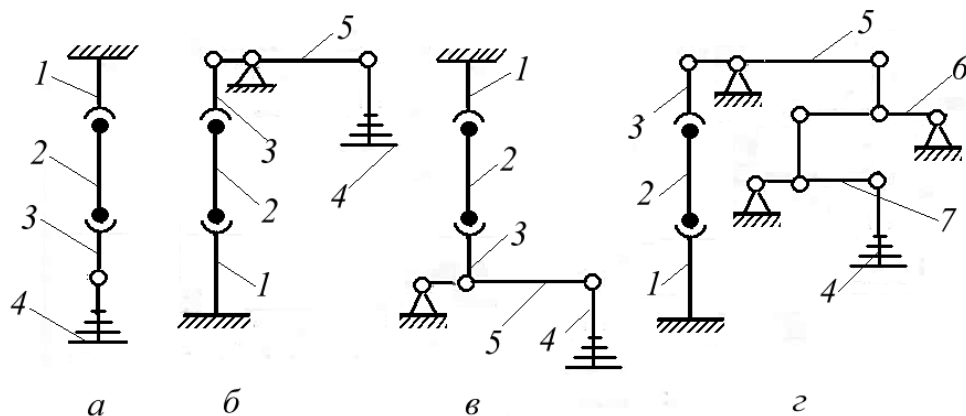


Рис. 3.5 Схеми систем навантаження зразків при випробуваннях на повзучість та тривалу міцність безпосередньо вантажами (а), важелем першого роду (б), важелем другого роду (в) та комбінованим важелем (з)

Пристрої з безпосередньо гравітаційним навантаженням (рис. 3.5а) є нескладними конструкціями, які складаються з двох захватів 1 і 3, зразка 2 і підвіски з платформою 4, на яку встановлюються вантажі.

Зусилля у зразку однозначно визначається сумарною вагою нижнього активного захвату, підвіски з платформою та вантажів. Тому аналізована схема забезпечує прикладення навантаження з високою точністю, що не спотворюється тертям в опорах і шарнірах, а також зміною довжини важелів у процесі приробітку шарнірів і призм (що має місце в пристроях важільного типу). Однак незручності, що виникають при використанні великих вантажів, обмежують область застосування такої схеми тільки випробуваннями нестандартних зразків невеликого діаметру і високотемпературними випробуван-

нями, за яких досягаються високі швидкості повзучості, і навантаження має задаватися з високою точністю.

У більшості пристроїв для випробувань на повзучість та тривалу міцність як основний елемент у механізмі навантаження використовується нерівноплечий вантажний важіль 5, на вільному кінці якого укріплена платформа 4 (рис. 3.5б,в). Навантаження до встановленого в захвати 1 і 3 зразку 2 передається від одиночного важеля або системи важелів 5, 6, 7 (рис. 3.5г) за допомогою вантажів, що розміщуються на платформі. Використовуються важільні механізми із співвідношенням плеч 1:5, 1:10, 1:20, 1:50, 1:100, що складаються з важелів першого (рис. 3.5б) та другого (рис. 3.5в) роду, а також із подвійних важелів другого роду або потрійних комбінованих важелів (рис. 3.5г). Співвідношення плечей від 1:50 і більше отримують на подвійних та потрійних важелях. Так, у установках АІМА-5, що випускаються промисловістю, використовується система навантаження з комбінованим триплечним важелем; при такій схемі досягається посилення навантаження в силовому ланцюжку в 100 разів.

Вантажні важелі встановлюються на призмах або спеціальних підшипникових опорах. Виникнення в опорах високих контактних напружень обмежує можливість отримання на приладах важелів високих граничних навантажень. Так, в установках для випробувань на тривалу міцність і повзучість максимальне зусилля, що розвивається, не перевищує 50 кН.

Важіль першого роду завжди встановлюється над зразком на верхній траверсі станини (рис. 3.5б), а важіль другого роду - в основі станини (рис. 3.5в). Застосування триплечного комбінованого важільного механізму (рис. 3.5г), що складається з силового важеля першого роду 5 із співвідношенням плечей 8:1, проміжного важеля 6 другого роду із співвідношенням плечей 5:1 і вантажного важеля 7 другого роду з плечами 2,5:1, дозволяє створити компактні та малогабаритні навантажувальні пристрої.

У комплект установок крім захватів та важільного механізму входять допоміжні механізми, які забезпечують плавне навантаження зразка на початку випробувань та підтримку у зразку у процесі навантаження постійного зусилля. Принцип їхньої дії розглянемо на схемі, наведеній на рис. 3.6а.

До зразка 1 через нижній захват 2 і важіль 5 прикладається навантаження від платформи з вантажами 6. Противага 3 слугує для врівноваження маси важеля відносно шарнірної опори 4. На початку випробувань статичне навантаження зразка здійснюється за допомогою пружинного механізму 8 шляхом плавного опускання важеля на платформі з вантажами. У процесі випробувань зразок подовжується та вантажний важіль повертається відносно опори. При цьому плече важеля від опори до підвіски з вантажами зменшується і,

отже, зменшується зусилля у зразку. Для відновлення його значення служить черв'ячно-гвинтовий механізм горизонтування важеля, що складається з редуктора 11 з електродвигуном 10, черв'ячно-гвинтової пари 12 і вантажного гвинта 13, жорстко з'єднаного з верхнім захватом зразка.

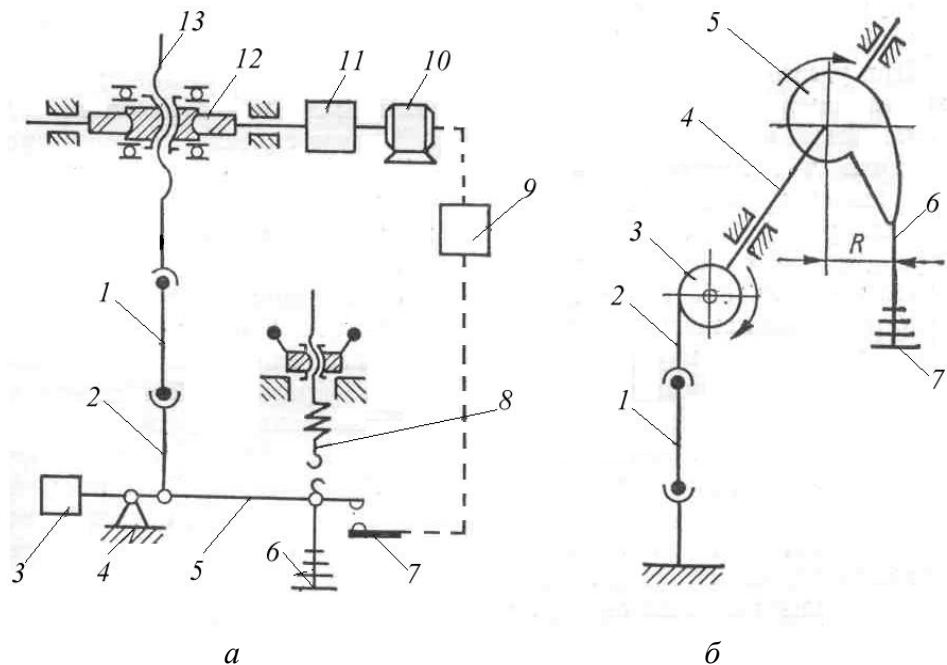


Рис. 3.6 Схеми систем навантаження зразків при випробуваннях на повзучість та тривалу міцність у режимі постійного навантаження (а) та постійного напруження (б)

При подовженні зразка прапорець, укріплений на кінці вантажного важеля, замикає нижній контакт 7 і викликає за допомогою блоку реле 9 включення електродвигуна, який через систему механічної передачі та ланцюжок верхній захват-зразок - нижній захват повертає вантажний важіль у вихідне горизонтальне положення. Контакт розмикається та відключає привід горизонтування важеля. Передатне відношення механізму горизонтування встановлюється таким, щоб переміщення верхнього захвату зі зразком не викликало виникнення інерційних навантажень у силовому ланцюгу при повороті важеля з вантажами. Однак і при виконанні цієї умови у зв'язку з необхідністю докладання до зразка додаткового навантаження для переміщення важеля в горизонтальне положення сталість зусилля у зразку не забезпечується, що викликає прискорення процесу повзучості та руйнування. Тому, якщо при дослідженні повзучості і тривалої міцності на розміри зразків немає обмежень, краще використовувати схему безпосереднього навантаження зразка вантажами. Недоліки, характерні для важільних гравітаційних систем, можна обійти за рахунок використання при тривалих випробуваннях схеми навантаження з пружним елементом (рис. 3.7б). Постійність навантаження у зразку

в цьому випадку забезпечується, як було показано вище, якщо деформація пружного елемента на початку випробувань задається значно більшою (на два порядки), ніж очікувана деформація повзучості зразка. Пристрої з пружинним способом навантаження отримали застосування в основному для випробувань малопластичних матеріалів при невисоких температурах, у таких умовах релаксаційна стійкість пружних елементів спеціальних пружинних сплавів забезпечується протягом дуже тривалого часу.

Установки промислового виробництва на дослідження повзучості і тривалої міцності металів переважно оснащені системами навантаження з важелевим механізмом, призначеним, як було показано, для випробувань у режимі сталості навантаження. При такому режимі навантаження в процесі подовження зразка відбувається зменшення площі поперечного перерізу і збільшення дійсних напружень. Отже, за допомогою стандартних установок не можна реалізувати такий режим навантаження, при якому протягом тривалих випробувань напруження підтримуються постійними. Для цієї мети використовуються спеціальні пристрої індивідуального виробництва, що забезпечують зміну навантаження пропорційно зменшенню площі поперечного перерізу зразка при деформуванні. Схема такого пристрою, що базується на використанні важеля зі змінним плечем, наведена на рис. 3.6б [47]. Навантаження до верхнього захвату зразка *1* прикладається за допомогою гнучкого елемента *2*, намотується на блок *3*. На осі блоку *4* жорстко зафіксований фігурний важіль *5*, до якого на гнучкому тросику *6* підвішений вантаж *7*. Гнучкий елемент одним своїм кінцем закріплений на блоці, а трос - на важелі. При повороті важеля в процесі випробувань, викликаному деформуванням зразка і поворотом блоку, на який намотується стрічка *2*, його плече зменшується і зменшується зусилля, що діє в зразку. Профіль фігурного важеля розраховується таким чином, щоб зниження сили було пропорційне зменшенню перерізу зразка; при цьому забезпечується сталість напружень у зразку.

Координати профілю фігурного важеля зазвичай визначають з умови сталості об'єму зразка, яка строго виконується тільки в тому випадку, якщо коефіцієнт Пуассона матеріалу близький до 0,5 (для металів $\mu = 0,25 \div 0,35$; для неметалічних матеріалів $\mu = 0 \div 0,5$, зокрема, для гуми $\mu = 0,5$). При виборі розмірів радіуса блоку та плеча важеля у вихідному стані необхідно враховувати пластичність досліджуваного матеріалу та вимоги до точності задання напружень. Так, для малопластичних та слабдеформованих матеріалів радіус блоку встановлюється рівним розрахунковій довжині зразка, а для пластичних – у 2 рази більшим. Плече важеля *R* у вихідному стані приймають рівним кільком (2-10) радіусам блоку.

Для забезпечення сталості напружень у зразку можуть використовуватися інші схеми навантаження. Постійне напруження в зразку при випробуваннях на повзучість можна також забезпечити при використанні установок з механізмом важеля навантаження (рис. 3.6а). У цьому випадку вантаж виконується фігурним, і при повороті вантажного важеля він повинен занурюватися в рідину. Профілю вантажу надається така форма, щоб при його зануренні в рідину зміна ваги за рахунок дії виштовхувальної архімедової сили була пропорційна зменшенню площі поперечного перерізу зразка при його видовженні.

Очевидно, що конструкція пристроїв, призначених для випробувань на повзучість при постійних напруженнях, складніша, ніж ті, що використовуються для випробувань за постійного навантаження. Тому вони набули меншого поширення та в основному застосовуються при спеціальних дослідженнях металів, а також при вивченні повзучості полімерних та інших неметалевих матеріалів, що характеризуються високою деформаційною здатністю.

Слід зазначити, що при випробуваннях пластичних металів і сплавів у режимі сталості напружень третя ділянка на кривих повзучості не реалізується, повзучість на другій ділянці має згасаючий характер і не завжди завершується руйнуванням зразка. Тому випробування металевих матеріалів на тривалу міцність при такому режимі навантаження практично не проводяться.

3.3.3 Пристрої та установки для випробування на релаксацію напружень

Дослідження релаксації напружень виконують в умовах розтягу, згину та кручення. При цьому так само, як і при дослідженні повзучості, основними є випробування на розтяг, які дозволяють отримувати коректні дані, що піддаються аналізу, щодо релаксаційної стійкості матеріалів. Умови лінійного напруженого стану, які реалізуються за розтягу, характерні для таких поширених кріпильних деталей, як болти та шпильки, які працюють виключно в умовах релаксації. Для оцінки міцності нероз'ємних з'єднань необхідно використовувати не тільки результати випробувань зразків, але й релаксаційні характеристики кріпильних деталей, визначені за умов, близьких до реальних. Врахування релаксації напружень також дуже важливо для оцінки працездатності різних пружин, витки яких деформуються при складному напруженому стані. Тому разом із дослідженням на релаксаційних установках зразків у практиці експерименту досить поширені випробування на релаксацію напружень болтів, шпильок, пружин та інших деталей у спеціальних обоймах і пристосуваннях.

Для випробувань зразків за розтягу застосовуються два типи пристроїв та установок, системи силовантаження яких відрізняються за принципом підтримки постійної деформації. Це пристрої із **замкнутим силовим контуром** та установки із системами **навантаження компенсаційного типу**.

Типова схема пристрою із замкнутим силовим контуром показана на рис. 3.7а.

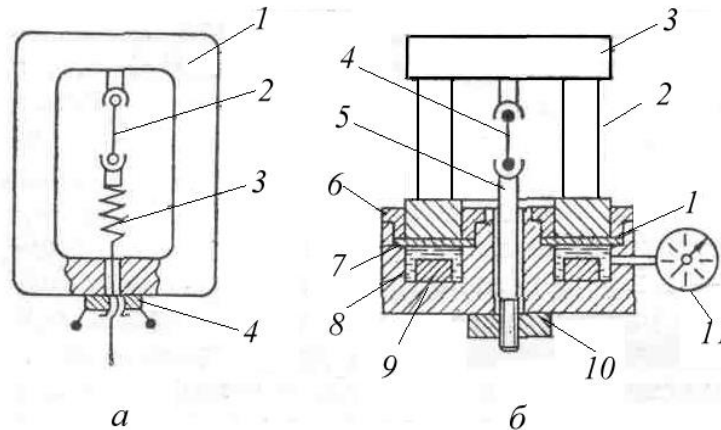


Рис. 3.7 Схеми пристроїв із замкнутим силовим контуром: з пружною механічною (а) і жорсткою гідравлічною (б) ланкою

У жорсткій рамі 1 закріпленій зразок 2. У ланцюгу навантаження зразка є пружна ланка 3, деформація якої відповідає пружній деформації таких елементів силового ланцюжка, як тяги, захвати і динамометр. Попередня деформація надається зразку гвинтовою парою при загвинчуванні гайки 4. Як впливає зі співвідношення (3.1), умови чистої релаксації в такому пристрої можна отримати тільки в тому випадку, якщо жорсткість пружної ланки значно більше жорсткості зразка. При цьому пружна деформація елементів системи замикання повинна бути дуже мала в порівнянні з деформацією зразка і в процесі релаксації напружень забезпечується сталість повної деформації зразка, а наростання її пластичної складової відбувається тільки за рахунок зменшення власне пружної деформації зразка.

Однак з використанням пристроїв такого типу практично неможливо відтворити явище релаксації в чистому вигляді. Це пояснюється тим, що пружну ланку не можна виконати абсолютно жорсткою з нульовою податливістю. Найменш жорстким елементом у цій ланці є динамометр, зі зміни деформації чутливого елемента якого визначаються напруження у зразку. Наблизитись до умов чистої релаксації за допомогою пристроїв із замкнутим силовим контуром можна лише при включенні в їх силовий ланцюг жорсткої гідравлічної ланки. З урахуванням нестисливості рідини податливість навантажувального ланцюга в цьому випадку буде набагато менше податливості зразка і в про-

цесі випробувань отримаємо характеристики релаксаційної стійкості матеріалу, близькі до характеристик чистої релаксації (див. рис. 3.4а).

Схема пристрою з жорсткою гідравлічною ланкою представлена на рис. 3.7б [31]. Силовий ланцюг зразка 4 замикається через масивні деталі з малою податливістю: основа 1, колони 2, ригель 3 і тяга 5, переміщенням якої за допомогою гайки 10 зразку надається початкова деформація. Зусилля від колони до основи передається через мембрану 7 і рідинний динамометр 8, робочий об'єм якого заповнений рідиною і вкладкою температурного компенсатора 9. Герметизація динамометра здійснюється за допомогою притискних фланців 6. При обертанні гайки зразок навантажується осьовим зусиллям, значення якого визначається за показанням манометра 11. У процесі випробувань напруження релаксують, тиск рідини та показання манометра змінюються. З огляду на показання манометра можна побудувати криві релаксації. На відміну від динамометрів з електричними параметричними перетворювачами гідравлічні динамометри характеризуються підвищеною жорсткістю. Оскільки жорсткість пружної ланки в замкнутому силовому ланцюгу визначається переважно жорсткістю динамометра, то застосування рідинних динамометрів при забезпеченні малої податливості інших силових елементів ланцюга замикання дозволяє з використанням принципової схеми, наведеної на рис. 3.7б, отримувати справжні характеристики релаксаційної стійкості металів і сплавів.

Пристрої із замкнутим силовим контуром не набули широкого поширення в практиці механічних випробувань через методичні труднощі, викликані необхідністю врахування жорсткості елементів ланцюга замикання при кількісній оцінці релаксації напружень.

Для дослідження релаксації напружень велике поширення отримали установки компенсаційного типу, принцип дії яких ґрунтується на підтримці постійної деформації зразка в процесі випробувань за рахунок навантаження [3]. Процедура випробувань зразків на установках цього типу полягає у наступному. На робочій ділянці зразка встановлюється тензомер, відстань між опорами якого відповідає розрахунковій довжині зразка. На початку випробувань зразку надається задана деформація та фіксується відповідне їй навантаження. Для навантаження використовуються важільні системи силозбудження односторонньої або двосторонньої дії із замкнутим контуром регулювання (останнім часом для навантаження на малих часових базах застосовуються і гідравлічні машини з електрогідравлічними перетворювачами). Зворотний зв'язок у системах силозбудження здійснюється за параметром повної деформації.

Після початкового навантаження зразка у ньому в процесі витримки під навантаженням відбувається накопичення деформації повзучості і зразок подовжується. Це подовження фіксується тензометром або реєструється електроконтактним пристроєм, що виробляє керуючий сигнал, який подається після перетворення на виконавчий орган. Розвантаження зразка відбувається до тих пір, поки за рахунок зменшення його пружної складової повна деформація не досягне свого первісного значення. У процесі подальшого навантаження довжина зразка знову збільшується і зменшення його навантаження здійснюється за рахунок ступінчастого розвантаження. Таким чином, в установках компенсаційного типу в процесі повзучості матеріалу забезпечується автоматичне зменшення діючого у зразку зусилля, темп якого визначається релаксаційною стійкістю матеріалу. Принципова схема релаксаційної установки з важільно-пружинною системою навантаження показана на рис. 3.8а.

Зразок 1 навантажується за допомогою пружини 3 через важіль 2; натяг пружини регулюється за допомогою черв'ячно-гвинтової передачі 4, яка приводиться в обертання електродвигуном 6 через редуктор 5. Команда на включення двигуна подається від блоку 7 сигналу від тензометра або електроконтактного пристрою 8.

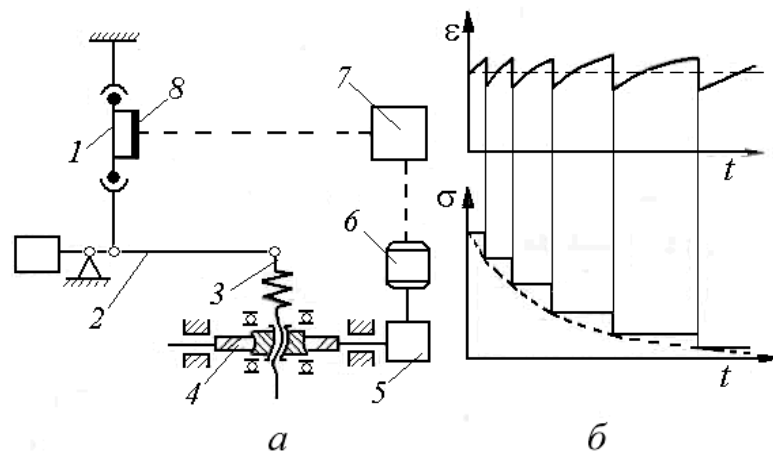


Рис. 3.8 Схема установки компенсаційного типу (а) та крива релаксації напружень отримувана на такій установці (б)

У процесі тривалих випробувань, які проводяться на базі до 5000 год, пружинний елемент може сам релаксувати. Тому в деяких установках навантаження зразка проводиться за допомогою бункера, що підвішується до важеля, заповненого рідиною, дробом або сталевими кульками. Періодична зміна навантаження здійснюється шляхом зливу порцій води або викидання дробу та кульок.

Зразок періодично дещо подовжується, то коротшає до вихідних розмірів. Цей процес схематично суцільною лінією показано на рис. 3.8б, де штриховою лінією показана ідеальна крива, що відповідає умовам чистої релаксації.

У аналізованому випадку зменшення напружень відбувається ступінчато і фактично відтворюється не релаксація, а багатоступінчаста повзучість з спадним напруженням. Величина сходів залежить від чутливості датчика деформації, інерційності використаної системи вироблення команд управління та виконавчого органу. У сучасних електрогідравлічних машинах із замкнутим контуром регулювання здійснюється практично безступінчасте зменшення напружень у зразку. В установках важільного типу досягнута також висока чутливість системи компенсації; спрацьовування механізму розвантаження відбувається при подовженні зразка не більше ніж на 0,01 - 0,05 мм/мм, тобто також імітуються умови випробувань, практично близькі до умов чистої релаксації. Отже, процес релаксації при випробуваннях на компенсаційних установках є послідовністю процесів повзучості за ступінчато спадних навантажень; і що менше ступінь зміни навантаження, то більше схема експерименту наближається до схеми чистої релаксації.

Розглянуте нами обладнання дозволяє досліджувати релаксацію напружень в умовах однорідного напруженого стану за розтягу. Випробування на релаксацію проводять також при згині і основним методом, який отримав найбільше поширення, є метод кільцевих зразків Одинга [2, 3]. Суть цього методу полягає у наступному. Кільцевий зразок, виконаний у вигляді бруса рівного опору згину (рис. 3.9а), навантажується за допомогою клина певної товщини, що вставляється в проріз шириною 3 мм.

Зразок з клином розміщується в нагрівальній пристрій і витримується у ньому деякий час. Після заданої витримки та видалення клина з прорізу зі збільшенням її ширини визначають напруження релаксації. Перевага цього методу перед іншими полягає у простоті процедури випробувань і в компактності самого навантажувального пристрою, яким є безпосередньо клин зі зразком. Використання методу Одинга для дослідження релаксаційної стійкості матеріалів виключає застосування складних навантажувальних пристроїв та установок із замкнутим контуром регулювання. Однак його недоліки не менш суттєві. Насамперед, випробування з його використанням можна проводити тільки за пружного деформування матеріалу при напруженнях, що становлять до $0,75 \sigma_{0,2}$. При цьому релаксоване напруження через неоднорідність напруженого стану визначається з великою похибкою. До недоліків методу слід також віднести необхідність періодичного вилучення клину з прорізу для виконання вимірювань. Отже, матеріал зразка піддається

термоциклічному впливу та визначені значення характеристик його релаксаційної стійкості при таких випробуваннях є недостатньо достовірними.

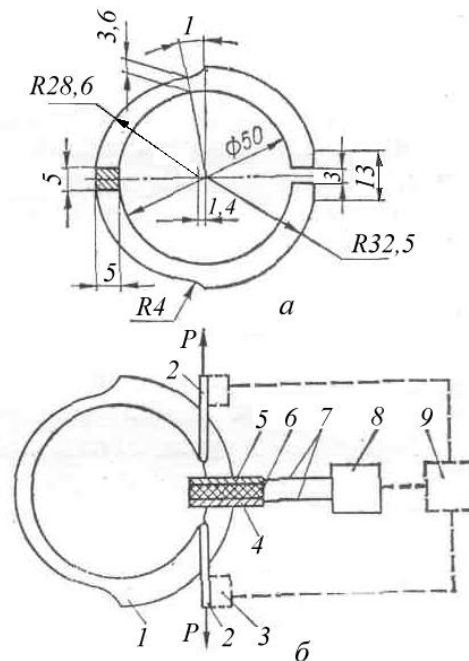


Рис. 3.9 Кільцевий зразок Одинга (а) та схема його навантаження (б)

Останній недолік методу кільцевих зразків можна усунути завдяки використанню схеми навантаження, аналогічної тій яка застосована в установках компенсаційного типу [28]. Принцип визначення напружень релаксації у цьому випадку ґрунтується на підтримці сталості ширини прорізу розклиненого зразка при тривалих випробуваннях. Кільцевий зразок *1* навантажується спеціальним клином з діелектричним прошарком *б* (рис. 3.9б). У зоні контакту клина і зразка виникають опорні реакції, що зменшуються в процесі релаксації напружень. Для їх вимірювання саме *і* використовується спеціальний клин, зовнішні пластини якого *4* і *5* виконані з металу і з'єднані провідниками *7* з вимірювальним блоком *8*. Електричний ланцюг вимірювання замикається через зразок, який підвішений на тягах *2*. До зразка через тяги прикладається зростаюче навантаження, яке компенсує реакцію опор до тих пір, поки значення навантаження і реакції опор не зрівняються. Цьому моменту відповідає розмикання електричного ланцюга у місці контакту зразка і клину. Сигнал про розмикання через вимірювальний блок *8* і *9* управління надходить на виконавчий механізм *3* для зменшення навантаження. При релаксації напружень реакція опор, а отже, і згинальний момент, в замкненому кільцевому зразку зменшуються, відбувається розмикання ланцюга та чергове розвантаження зразка. Величина сходів на кривій релаксації залежить від чутливості систем вимірювання та навантаження.

Розглянутий спосіб випробувань дозволяє виконувати вимірювання дистанційно, без вилучення зразка з нагрівального пристрою і без порушення режиму випробувань. Однак при цьому метод Одінга втрачає свою основну перевагу - простоту.

3.4 Пристрої і копри для випробування при одноразовому динамічному навантаженні

3.4.1 Особливості випробувань за динамічного навантаження

Випробування зразків за динамічного навантаження проводяться для отримання характеристик міцності, пластичності та тріщиностійкості матеріалів, а також для вивчення закономірностей їх деформування та руйнування при високих швидкостях деформування, що мають місце в умовах вибухового та ударного прикладення навантаження, на фронті пружнопластичних та ударних хвиль.

При динамічних випробуваннях використовуються найпростіші схеми навантаження, такі, як розтяг (стиск) стрижневих зразків за одновісного напруженого стану або деформування пластин (листових зразків) у плоских хвилях навантаження. Випробування на зсув і кручення застосовуються при порівняно невеликих швидкостях навантаження і мають обмежене поширення. В умовах згину в основному визначаються характеристики ударної в'язкості, з використанням яких проводиться якісна оцінка схильності конструкційних матеріалів до крихкого руйнування.

Специфічна дія динамічних навантажень на матеріал починає проявлятися вже при швидкостях деформації, що досягають 10^{-1} - 10^1 с^{-1} (10 мм/с - 1м/с) [21, 35, 43]. При їх збільшенні до 10^2 с^{-1} (1-10 м/с) навантаження супроводжується поширенням та інтерференцією пружнопластичних хвиль та суттєво нерівномірним розподілом деформації за довжиною зразка, при цьому процес деформування наближається до адіабатичного, так як відведення тепла в навколишнє середовище не може компенсувати швидкого нагріву матеріалу, що відбувається протягом дуже малого проміжку часу - тривалістю в кілька десятків мікросекунд. Якщо швидкості деформації досягають 10^4 с^{-1} (100-1000 м/с), у стрижневому зразку утворюються потужні ударні хвилі, що викликають якісну зміну напружено-деформованого стану порівняно з нижчими швидкостями.

У загальному випадку збільшення швидкостей деформування ініціює виникнення у зразку та ланцюгу силонанвантаження нестационарних полів напружень і деформацій, що ускладнює порівняння результатів дослідження

при статичному та динамічному навантаженні. Випробування в умовах високошвидкісного деформування вимагають використання спеціальних методів дослідження та аналізу результатів у локальних об'ємах матеріалу.

Основна умова, яка повинна виконуватися для отримання порівнюваних результатів вимірювання в широкому інтервалі швидкостей деформування зразків, пов'язана з *необхідністю підтримки однорідності напруженого та деформованого стану на робочій ділянці зразка*. Виконання цієї умови методично здійснено при швидкостях деформування до 10-25 м/с. В області більш високих швидкостей, особливо при випробуваннях на розтяг, цю умову важко витримати через вплив хвильових процесів і радіальної інерції. При високих швидкостях практично неможливо отримати криву деформування безпосередньо в процесі експерименту і її будують для локальних областей, ґрунтуючись на результатах аналізу неоднорідності деформації матеріалу при розповсюдженні пружно-пластичних і ударних хвиль. При цьому враховується, що при швидкостях удару до 1000 м/с (10^4 - 10^5 с⁻¹) процеси високошвидкісної деформації в зразку виявляються тільки в початковий період деформування в прилеглій до поверхні зіткнення області, а при віддаленні від цієї поверхні фронт хвилі розмивається і швидкість деформування швидко зменшується. Тому значення механічних показників фактично відповідають нижчим швидкостям, ніж, які вимірюються в останній момент зіткнення бойка і зразка.

Досить нагадати, що неврахування хвильових процесів може призвести до неправильного трактування результатів і навіть висновку про відсутність впливу швидкості на криву деформування.

Допустимий діапазон досліджуваних швидкостей навантаження при механічних випробуваннях обмежується не технічними можливостями засобів експерименту, а можливостями коректного визначення при високошвидкісному навантаженні механічних характеристик матеріалів та аналізу на основі отриманих експериментальних даних закономірностей їх деформування та руйнування. Вже при швидкостях до 50 м/с і більше процес деформування є адіабатичним і тому при імпульсному навантаженні можливе різке підвищення температури випробуваних матеріалів та порушення температурних умов випробувань. Виникнення радіальних інерційних сил також дуже суттєво обмежує можливість коректного аналізу отриманих результатів при динамічних випробуваннях на розтяг та обумовлює необхідність використання циліндричних зразків невеликих діаметрів, в яких можна знехтувати врахуванням впливу інерційних ефектів на порушення одноосності напруженого стану. Накладення при високих швидкостях в умовах динамічного розтягу прямих і відбитих поздовжніх пружнопластичних хвиль може викли-

кати руйнування довгих зразків одночасно в декількох перерізах робочої ділянки, що збігаються з зонами формування піків напружень. Тому при високошвидкісних випробуваннях на розтяг, по-перше, необхідно використовувати зразки з малою довжиною робочої ділянки і, по-друге, в ланцюг силонавантаження доцільно включати хвилеводи-динамометри такої довжини, при якій час пробігу поздовжньої хвилі по силовому ланцюгу туди і назад був би значно більшим часу до руйнування зразка.

Динамічні випробування мають також обмеження і по реалізації режимів навантаження [35, 43]. Будь-який довільний закон навантаження $\sigma = \sigma(t)$ чи деформування $\varepsilon = \varepsilon(t)$ практично може бути здійснений при швидкостях деформування, що не перевищують 10 c^{-1} , на установках з електрогідравлічними розподільниками. При більш високих швидкостях можна здійснити лише режими випробувань, за яких у процесі навантаження забезпечується сталість напружень ($\sigma = const$), швидкості навантаження ($\dot{\sigma} = const$) чи швидкості деформування ($\dot{\varepsilon} = const$).

Режим випробування $\sigma = const$ реалізується при ударному навантаженні зразка довгим стрижнем, швидкість якого визначає амплітуду напружень, а довжина - тривалість прямокутного імпульсу. Випробування в такому режимі застосовуються для дослідження закономірностей поширення пружнопластичних хвиль у стрижнях при дії постійних напружень і особливостей розвитку малих пластичних деформацій в матеріалі, що імпульсно навантажується. Очевидно, що в даному випадку за результатами експерименту не можна побудувати повні діаграми деформування і визначити характеристики міцності та пластичності матеріалу.

При випробуваннях в режимі $\dot{\sigma} = const$ для навантаження використовуються удар масивного вантажу по головці зразка через спеціальний хвилевід; зіткнення стрижнів, поверхні яких мають вигляд напівсфери; удар сталеві кульки по плоскому торцю стрижня. Цей режим забезпечує лінійний закон навантаження лише у пружній області, але на ділянці діаграми, що відповідає пластичному деформуванню, не витримується.

Випробування на розтяг з постійною швидкістю деформування ($\dot{\varepsilon} = const$), найчастіше реалізуються за динамічного (швидкісного та імпульсного) навантаження, вони забезпечують реєстрацію повної діаграми деформування та визначення характеристик міцності та пластичності, які зіставні з отриманими при короткочасних статичних випробуваннях у жорсткому режимі навантаження. Найбільш поширеною в цьому випадку при ударних випробуваннях є схема ударного навантаження зразка масивним бойком по одній з головок. Якщо маса бойка забезпечує запас його кінетичної енергії, що значно перевищує втрати на деформування та руйнування зразка, то швидкість

деформування може бути оцінена за швидкістю руху бойка перед ударом. При цьому точність підтримки постійної швидкості деформації визначається жорсткістю ланцюга навантаження та законом наростання швидкості у початковий період деформування.

Необхідно відзначити, що аналізований режим навантаження може відпрацьовуватися при динамічних випробуваннях на різних типах установок і копрів із забезпеченням коректної побудови діаграм деформування в координатах $\sigma - \varepsilon$. Дійсно, при такому режимі випробувань внаслідок лінійного збільшення відносної деформації в часі $\varepsilon = \dot{\varepsilon} t$ криву $\sigma(t)$ можна розглядати як діаграму деформування $\sigma(\varepsilon)$ зі зміненим по осі абсцис масштабом. Це дозволяє відмовитися від дуже складної реєстрації залежності $\varepsilon(t)$, необхідної для побудови діаграми деформування. Напруження реєструються за допомогою стрижня-динамометра, період поздовжніх коливань якого перевищує тривалість процесу руйнування.

На закінчення відзначимо, що для швидкісного деформування потрібні великі потужності, які можуть бути досягнуті в машинах безперервної дії з дуже потужним високопродуктивним приводом (в основному в машинах з гідравлічним та пневматичним збудженням).

3.4.2 Установки з гідравлічними, пневматичними та магніто-імпульсними перетворювачами

Для проведення випробувань при швидкісному та ударному навантаженні використовуються спеціальні установки з гідравлічними перетворювачами. Вони дозволяють отримувати швидкості деформування до 15 м/с при максимальних навантаженнях до декількох меганьютонів [22] у режимах швидкісного та ударного навантаження. Такі режими здійснюються завдяки попередньому накопиченню енергії у гідравлічній системі з подальшою передачею її зразку. За характером накопичення енергії системи збудження поділяють на кінетичні та потенційні. У гідравлічних кінетичних системах енергія накопичується в рідині, що рухається по трубопроводу, а в потенційних - в акумуляторах. Схема установки із системою силонавантаження кінетичного типу з роторним гідропульсатором наведена на рис. 3.10а [22].

Для накопичення кінетичної енергії в потоці рідини гідроагрегат 1 включають спочатку в роботу з необхідною продуктивністю в замкнутий кільцевий трубопровід 2. У цьому трубопроводі рідина розганяється. Накопичена в рідині енергія передається на зразок 4 шляхом скидання рідини з кільцевого трубопроводу в робочий циліндр машини 5 за допомогою пускового клапана 3.

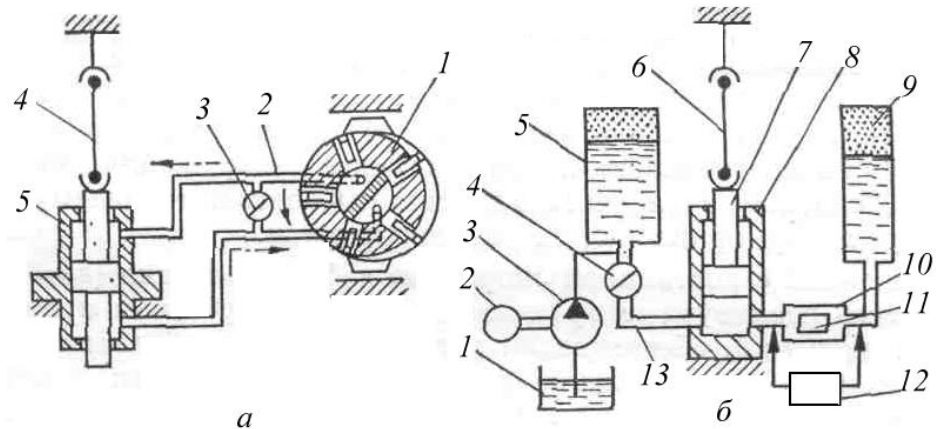


Рис. 3.10 Схеми систем навантаження швидкісних машин з гідравлічним збудженням при накопиченні енергії в кільцевому трубопроводі (а) та при двостадійному перетворенні енергії (б)

При використанні такої схеми збудження з накопиченням кінетичної енергії динамічне навантаження може прикладатися до попередньо навантаженого статичним зусиллям зразка. Ефект від застосування роторних гідропульсаторів у таких системах може бути суттєво збільшений при з'єднанні ротора з механічним накопичувачем кінетичної енергії – масивним маховиком. Ротор з маховиком розганяються в холосту до необхідної частоти обертання, а потім гідроагрегат перемикається на роботу в режимі максимальної продуктивності. У цьому випадку розширюється діапазон реалізованих швидкостей деформування як при швидкісному, так і ударному навантаженні.

Основним елементом у швидкісних гідравлічних установках з потенційною системою збудження є гідропневматичний акумулятор, у якому зі збільшенням тиску створюється великий запас потенційної енергії. Передача накопиченої енергії до зразка може здійснюватися при скиданні рідини у робочу порожнину гідроциліндра через електрогідравлічний розподільник або за допомогою швидкісного пускового клапана.

У швидкісних машинах з кінетичним збудженням можна досягти більшої стабільності швидкості деформування, ніж у машинах з потенційним збудженням. Однак граничні швидкості в першому випадку обмежені, і це пов'язано з неможливістю необмеженого збільшення потужності приводу і витрати рідини (фірма «Шенк» застосовує для швидкісних машин триступінчасті електрогідравлічні розподільники з номінальною подачею до 3400 л/хв).

Підвищити швидкісну стабільність машин з потенційним збудженням можна завдяки використанню систем із двостадійним накопиченням енергії (рис. 3.10б). На першій стадії відбувається накопичення потенційної енергії в

активному акумуляторі 5, куди масло подається насосом 3 електроприводом 2 з бака 1. На другій стадії енергія передається масі рідини в інерційному трубопроводі 13, який з'єднує робочий гідроциліндр 8 з активним 5 і пасивним 9 акумуляторами. Необхідна швидкість руху рідини в інерційному трубопроводі, від якої залежить швидкість переміщення поршня 7 гідроциліндра, жорстко пов'язаного із зразком 6, задається автоматичним обмежувачем 10. При попередньому налаштуванні обмежувача його поршень 11 встановлюється в наперед задане відкаліброване положення блоком налаштування 12. В процесі роботи установки швидкість деформування зразка визначається не тільки запасом потенційної енергії в активному акумуляторі та швидкістю спрацьовування пускового клапана 4, але і витратою рідини, що дроселює через шляховий обмежувач в пасивний акумулятор.

З використанням установок з гідравлічними перетворювачами можна реалізувати режими як ударного, так і швидкісного навантаження,

У пневматичних установках безперервної дії зразок жорстко з'єднаний тягою з поршнем пневмоциліндра і його навантаження здійснюється при скиданні стисненого газу з ресивера в пневмоциліндр [35, 43]. Кінематична схема такої установки показана на рис. 3.11а. Зразок 2 закріплений у захватах 1 і 3. При спрацьовуванні швидкісного пускового клапана 6 газ з ресивера 8 по трубопроводу 7 надходить у підпоршневий простір циліндра 4 і переміщує поршень 5. Закон деформування зразка визначається рухом активного захвата 3. Розтяг зразка починається одночасно з рухом поршня за досягнення в об'ємі V_2 тиску, що врівноважує вагу рухомих деталей і силу тертя поршня в циліндрі.

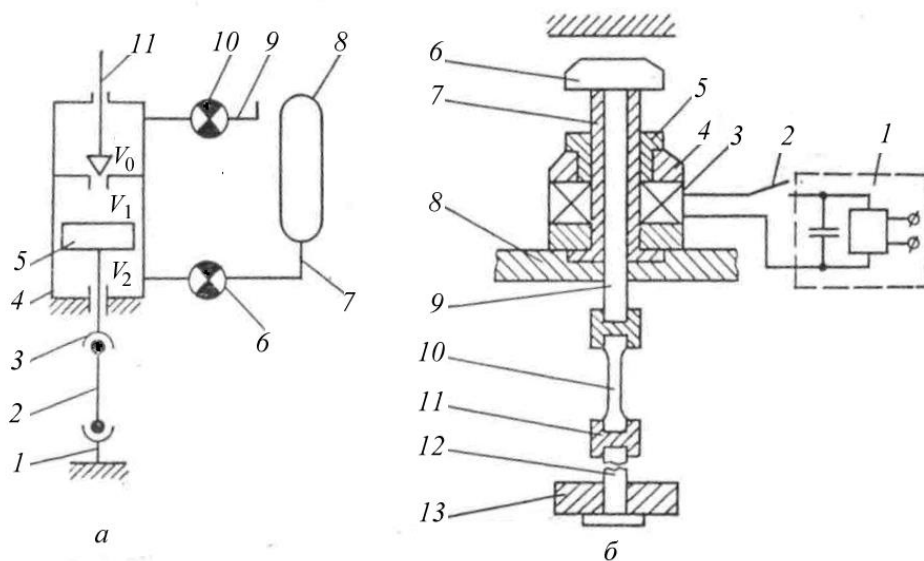


Рис. 3.11 Схеми систем динамічного навантаження з пневматичним (а) та магнітоімпульсним збудженням (б)

Таким чином, в установках проаналізованого типу в якості джерела енергії для деформування зразка використовується потенційна енергія стиснутого газу, що накопичується в ресивері. Конструкції пневматичних установок відрізняються великою різноманітністю за значенням об'ємів V_0, V_1, V_2 , схемами їх з'єднання з ресивером і між собою, а також за типом робочого середовища (об'єми V_0 і V_1 можуть заповнюватися рідиною).

Змінюючи швидкість подачі та випуску газу або рідини каналами 7 і 9 за допомогою клапанів 6, 10 і вентиля 11, на цих установках можна здійснювати різні режими навантаження зразка (при швидкостях деформації не більше 10 с^{-1}). Так, якщо забезпечити сталість тиску в об'ємі V_2 при миттєвому відкритті клапана, то за рахунок регулювання швидкості перетікання рідини з об'єму V_1 в V_0 можна реалізувати режим навантаження при постійній швидкості деформації зразка. Безперервна рівномірна подача газу в об'єм V_2 (за умови з'єднання об'ємів V_0 та V_1 з атмосферою) дозволяє проводити випробування в режимі сталості швидкості навантаження ($\dot{\sigma} = \text{const}$), а при підтримці постійного тиску в об'ємі V_2 та з'єднанні об'ємів V_0 та V_1 з атмосферою отримують режим навантаження, що відповідає $\sigma = \text{const}$. Варіюючи тиск у камерах пневмоциліндра, у загальному випадку можна отримувати будь-який довільний закон навантаження при швидкісних випробуваннях.

Таким чином, системи силонавантаження розглянутого типу характеризуються широкими можливостями з відпрацювання в процесі швидкісного навантаження зразка різних режимів випробувань, однак слід зазначити, що здійснення кожного конкретного режиму в усьому реалізованому діапазоні швидкостей деформування ($5 \text{ мм/с} - 1 \text{ м/с}$) утруднене через обмеження, що накладаються жорсткістю деталей силового ланцюга та їх інерційністю.

Магнітоімпульсний спосіб збудження навантажень використовується для дослідження динамічної міцності матеріалів при ударному навантаженні. Цей спосіб дозволяє отримувати будь-які швидкості деформування в діапазоні від 10 до 100 м/с та проводити випробування при постійній швидкості навантаження. Типова схема магнітоімпульсного пристрою для випробувань на розтяг показана на рис. 3.11б. Основним елементом пристрою, призначеним для формування електричних імпульсів необхідної величини та тривалості, є генератор імпульсного струму 1, який складається з конденсаторної батареї та високовольтного джерела живлення з випрямлячем. Замикання розрядного ланцюга від генератора на індуктор 3 відбувається за допомогою комутатора 2. На торці індуктора, який представляє собою котушку з намоткою з мідного дроту, встановлений металевий бойок 4. Ударник бойка 5, виконаний з ударостійкого матеріалу, в процесі навантаження переміщається по

втулці 7, закріпленій в підставці 8. Зразок 10 через головки 11 з'єднаний з мірним стрижнем Гопкінсона 12 і хвилеводом 9. На стрижень 12 наклеєні тензорезистори для вимірювання зусилля в ланцюгу силонавантаження, а до його кінця прикріплений інерційний вантаж 13, що забезпечує нерухомість стрижня в процесі навантаження. Головка б хвилеводу, що є ковадлом, вільно спирається на торцеву поверхню втулки 7.

Випробування з використанням зазначеного пристрою проводять наступним чином.

Після накопичення необхідного заряду в генераторі електричний ланцюг замикається за допомогою комутатора і імпульс електричного струму надходить на магнітний індуктор, який збуджує імпульс тиску, що діє на бойок з ударником. У ланцюгу силонавантаження при ударі бойка по голівці хвилеводу виникає ударний вплив, який передається через хвилевід на зразок і стрижень Гопкінсона.

На магніто-імпульсних пристроях можна отримувати будь-яку задану швидкість деформування зразка завдяки лінійній залежності швидкості зіткнення бойка з голівкою хвилеводу від напружень заряду конденсаторних батарей, яку можна плавно змінювати за бажанням експериментатора. Магніто-імпульсні установки для випробувань на розтяг та стиск набули досить широкого поширення у практиці експерименту, незважаючи на підвищені вимоги до забезпечення безпеки їх високовольтного обладнання [23].

3.4.3 Маятникові, ротаційні та вертикальні копри

Маятникові копри застосовуються для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів за ударного навантаження зі швидкостями деформування до 7 м/с. Найбільшого поширення набули методи випробувань на двоопорний ударний згин (метод Шарпі) та консольний ударний згин (метод Ізода). Більш обмежене поширення ці копри знаходять при випробуваннях на ударний розтяг та ударний зсув.

Вперше конструкція двостікового маятникового копра була описана Шарпі в 1901 р., і з тих пір вона не зазнала принципових змін (двостійковий копер Амслера і спеціальний одностійковий копер Ізода для випробування консольних зразків на ударний згин принципово нічим не відрізняються від широко використовуваного в наш час копра Шарпі). Спочатку цей копер був розроблений для випробувань зразків на ударний згин, і його застосування до теперішнього часу за інших видів випробувань дуже обмежене.

Основним елементом копра є важкий плоский молот маятника 2, який жорстко з'єднаний зі штангою 1 і може вільно обертатися навколо осі 0 (рис. 3.12а).

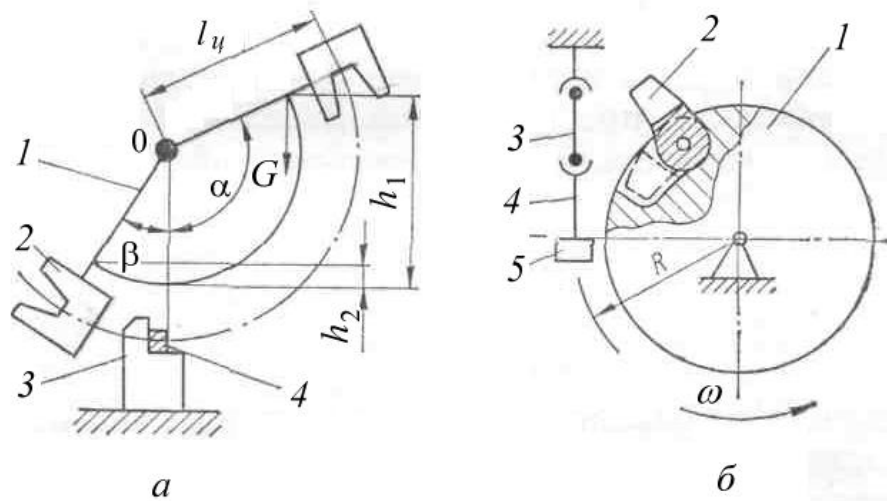


Рис. 3.12 Схема завдання удару в маятниковому (а) і в ротаційному (б) копрах

Перед випробуваннями він піднімається поворотом штанги на кут, який може становити до 160° , і утримується у вихідному положенні клямкою. Після звільнення від закріплення маятник описує дугу, передаючи в нижній точці траєкторії частину своєї кінетичної енергії зразку 4, встановленому на опорах 3. Після руйнування зразка маятник відхиляється на деякий кут.

Запас енергії маятника будь-якої миті часу визначається як добуток його ваги на висоту підйому. Витрачена на руйнування зразка робота визначається як різниця енергії маятника до та після удару за формулою

$$K = G(h_1 - h_2) \quad \text{або} \quad K = Gl_u(\cos \beta - \cos \alpha), \quad (3.3)$$

де G – вага маятника; h_1 і h_2 – висота підйому центра ваги маятника відносно точки зустрічі бойка з зразком до і після удару; l_u – відстань від центру обертання до центру удару; α і β – кути підйому маятника.

Стандартні маятникові копри мають шкалу, за якою за допомогою стрілки-показчика можна безпосередньо без перерахунків за формулами (3.3) визначити величину роботи руйнування. Швидкість руху молота маятника в момент зіткнення залежить від висоти падіння: $v = \sqrt{2gl_u(1 - \cos \alpha)}$, де g – прискорення вільного падіння.

Відстань від центру обертання маятника до центру удару знаходиться за періодом його коливання:

$$l_{ц} = \frac{g}{4\pi^2} T^2, \quad (3.4)$$

де T – період повного коливання маятника.

Отже, положення центру удару можна визначити, знаючи період повного коливання маятника і розрахувавши $l_{ц}$ за формулою (3.4).

Для отримання відтворюваних значень ударної в'язкості, яка є якісною порівняльною характеристикою схильності матеріалу до крихкого руйнування, при підготовці копра до випробувань необхідно забезпечити ряд методичних вимог. Так, необхідно забезпечити співпадіння робочої кромки ножа з поздовжньою віссю маятника. При вільно висячому маятнику робоча кромка ножа молота повинна бути розташована вертикально, для чого маятник врівноважується щодо своєї осі, а центр удару повинен збігатися з місцем зіткнення ножа зі зразком і розташовуватися на середині ширини зразка. При випробуваннях на двоопорний згин призматичний зразок повинен строго горизонтально встановлюватися на опорах, при цьому розташування зразка щодо опор має бути симетричним.

Як зазначалося, найбільше застосування маятникові копри отримали при випробуваннях на двоопорний ударний згин. Для випробувань на ударний розтяг використовуються копри зі зміненою конструкцією молота та опор. При цьому найчастіше відтворюється схема навантаження, за якою зразок з пристосуванням для його кріплення та ковадлом встановлюється на молоті маятника, а бойок - на опорах. В цьому випадку в процесі ударного навантаження бойок нерухомий, а зразок переміщається разом з маятником

Якщо запас кінетичної енергії маятника значно перевищує роботу, що йде на руйнування зразка, то при випробуваннях на розтяг реалізується режим сталості деформації ($\dot{\varepsilon} = const$). Однак при ударних випробуваннях на розтяг на маятникових копрах не можна забезпечити чистоту експерименту (як по відношенню до відтворюваності результатів, так і реалізації певного режиму навантаження), тому вони використовуються для випробувань тільки в тих випадках, якщо експериментатор не має іншого обладнання.

Промисловістю ближнього зарубіжжя випускаються маятникові копри із запасом енергії від 2 до 300 Дж, а далекого зарубіжжя – від 0,5 - 750 Дж (у каталогах японської фірми «Торсі» згадуються копри із запасом енергії 1000, 5000 і 10000 Дж). Сучасні копри від 150 Дж і вище представляють собою складні випробувальні комплекси з пристроями автоматичного підйому і спуску маятника, оснащені досконалою вимірювальною апаратурою та електронно-обчислювальними системами для обробки та подання результатів експерименту.

За допомогою **ротаційних копрів** можна отримувати швидкості деформування до 300 м/с [18, 21]. Однак практичне проведення випробувань при таких швидкостях деформування важко здійснити через вібрації, що виникають, і в даний час ротаційні копри в основному використовуються при швидкостях до 25-30 м/с, за яких ще можна реєструвати процес деформування.

У ротаційних копрах кінетична енергія накопичується за допомогою розгону махових мас, які у момент навантаження зчеплюються зі зразком, деформуючи його у режимі постійної швидкості деформації ($\dot{\epsilon} = const$). Маховик - ротор 1 копра (рис. 3.12б) приводиться в обертання від електродвигуна через клинопасову передачу. Після досягнення маховиком робочого значення частоти обертання по команді оператора спрацьовує електромагнітна клямка (на малюнку не показана), що утримує бойок 2 у вихідному положенні утопленим у гнізді маховика, відбувається викид бойка і він ударяє по ковадлу 5, жорстко з'єднаного з активним захватом 4 зразка 3. Регулюючи за допомогою електроприводу та системи передач частоту обертання маховика, можна отримувати різні значення швидкості деформування зразка відповідно до формули

$$v = \omega R = \frac{\pi n R}{30}, \quad (3.5)$$

де ω – кутова швидкість; n – частота обертання маховика, об/хв; R – радіус удару, рівний відстані від осі обертання маховика до центру удару.

Як випливає з формули (3.5) значення швидкості можна також варіювати шляхом зміни радіусу удару.

Вітчизняною промисловістю ротаційні копри не випускаються. Копри фірми WPM (Германія), які до теперішнього часу експлуатуються на пострадянському просторі, дозволяють варіювати швидкість в інтервалі значень від 5 до 50 м/с. У цих копрах використовуються маховики товщиною 100 мм і діаметром 600 мм, що забезпечують при максимальній частоті обертання запас кінетичної енергії до 120 кДж.

У **вертикальних копрах** з вантажем, що вільно падає, ударне навантаження збуджується в результаті падіння з деякої висоти вантажу під дією гравітаційних сил. Швидкість вантажу в момент удару бойка по зразку визначається із співвідношення

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (3.6)$$

Якщо бойку з вантажем надано запас кінетичної енергії, що принаймні на порядок перевищує роботу руйнування зразка, навантаження зразка відбу-

вається в режимі постійної швидкості деформування, чисельно рівної швидкості вантажу в момент удару і визначається з формули (3.6). Відомі копри без напрямних з висотою падіння до 12 м [18], на яких отримані швидкості деформування до 11 м/с; висота копра з напрямними зазвичай не перевищує 4 м і реалізовані на них швидкості можуть досягати 6 м/с [18, 43]. В даний час завдяки використанню в силовому ланцюгу зразків ступінчастих хвилеводів на вертикальних копрах при швидкості падіння вантажу до 6 м/с отримують швидкості деформування до 25 м/с [43].

За конструктивною схемою всі вертикальні копри поділяють на дві основні групи: *до першої* відносяться копри з падаючим зразком, а *до другої* - з нерухомим. Відповідно до першої схеми навантаження (рис. 3.13а) до зразка 2 кріпляться два вантажі - верхній контрвантаж 1 і нижній основний вантаж 3, від маси якого залежить запас кінетичної енергії, який частково витрачається на руйнування зразка .

У вихідному положенні зразок з вантажами піднімається на висоту h . Після падіння з цієї висоти контрвантаж, що виконує в даному випадку функцію бойка, ударяється по ковадлу 4 кільцевого перерізу і стопориться, циліндричний вантаж проходить в отвір наковальні і, продовжуючи рух, розриває зразок.

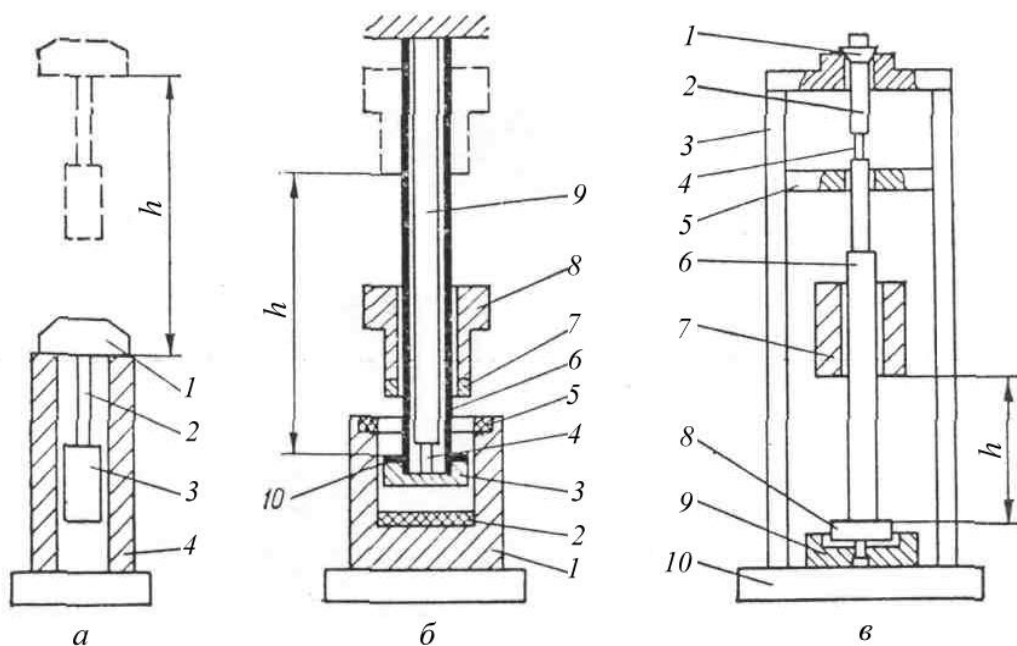


Рис. 3.13 Схема завдання удару вантажем, що вільно падає
а – падаючий зразок, б, в – нерухомий зразок

Робота, витрачена на руйнування, визначається за результатами вимірювання швидкості основного вантажу як різниця кінетичної енергії до удару та після розриву за формулою

$$K = \frac{m}{2}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.7)$$

де m – маса основного вантажа; v_1 і v_2 – швидкість вантажа до удару і після руйнування зразка.

До кінця 30-х років минулого століття випускалися копри з падаючим зразком двох модифікацій – з напрямними та без них. Зараз і ті й інші практично не використовуються і представляють переважно історичний інтерес. Це пов'язано з тим, що використання формули (3.7) дає хороший результат при визначенні роботи руйнування тільки в тому випадку, якщо після удару контрвантаж по ковадлу не відбувається його відскоку, що методично важко забезпечити. Після того як роботами Н.Н. Давиденкова [18] було показано, що неврахування відскоку контрвантаж в копрах призводить до значної помилки у визначенні роботи руйнування, що досягає 50% і більше, застосування вертикальних копрів з падаючим зразком при високошвидкісних випробуваннях різко обмежилося.

В даний час в основному використовуються вертикальні копри з нерухомим зразком. Схема такого копра сучасної конструкції, що дозволяє одержувати швидкості деформування до 6 м/с, наведена на рис. 3.13б. Для випробувань на розтяг використовуються малі циліндричні зразки з діаметром 4 мм та довжиною робочої ділянки 10 мм [43]. Зразок 4 за допомогою різьбових головок з'єднаний зі стрижнем-динамометром 9 і ковадлом 3, що сприймає удар бойка кільцевого перерізу 7. Вантаж 8 при падінні з заданої висоти h ковзає по напрямній 6, яка представляє собою трубу з нержавіючої сталі. Направляюча верхнім кінцем кріпиться до ригеля рами копра, а іншим за допомогою ковадла фіксується в стакані платформи 1. Стрижень-динамометр із зразком центрується по осі направляючої в зоні захватів ковадла, які мають розточування глибиною, не меншою залишкового подовження зразка, а в зоні ригеля - спеціальною шайбою (на малюнку не показано). Точне виготовлення деталей навантажувального пристрою забезпечує плоский аксіальний удар, необхідний для отримання відтворюваних результатів.

Вузол кріплення вантажу складається із системи тросів із клямкою, з допомогою якої відбувається звільнення вантажу по команді оператора від закріплення, після чого починається його вільне падіння. Для запобігання в момент зіткнення відскоку вантажу від наковальні і демпфування удару між бойком і ковадлом встановлена деформована металева прокладка 10, а для гасіння залишкової енергії вантажу на платформі розміщено кільце амортизаційне 5, яке сприймає удар вантажу після розриву зразка. Амортизаційна шайба 2 служить для демпфування удару ковадла з залишками зруйнованого зразка по дну стакана.

Рама копра, до якої кріпиться весь вузол навантаження, складається з ригеля, двох стійок і встановлюється на плиті, що спирається на потужний фундамент. Силовий ланцюжок при ударних випробуваннях на таких копрах замикається через ковадло, зразок, динамометр, ригель, стійки та плиту на фундамент; крім того, фундамент сприймає ударні навантаження, що виникають при ударі вантажу по амортизаційній платформі. Висота вертикальних копрів типу, що розглядається, не перевищує 2 м, що забезпечує отримання швидкостей деформування до 6 м/с в режимі сталості деформації.

Для випробувань на розтяг зі швидкістю до 25 м/с на вертикальному копрі використовується ефект зміни швидкості пружної хвилі при її поширенні по стрижню зі ступінчастою зміною перерізу [43] (рис. 3.13в). Зразок 4 за допомогою різьбових головок з'єднаний з динамометром 2 і ступінчастим стрижнем-хвильоводом 6, на кінці якого закріплено легке ковадло 8, що сприймає удар вільнопадаючого вантажу 7. Центрування ланцюга силонавантаження забезпечується за рахунок точного виготовлення напрямних поверхонь в ловителі 9 зразку 4, динамометрі 2 і поперечині 5, а також завдяки використанню кульової опори 1. Силовий контур у копрах такого типу замикається через хвилевід, зразок, динамометр, верхню поперечку, стійки 3, плиту 10 і фундамент на ґрунт.

При ударі вантажу по ковадлу в хвилеводі збуджується пружна хвиля і при її відбитті від кінця хвилеводу в зразку реалізується швидкість деформування, яка набагато перевищує швидкість вантажу при його зіткненні з ковадлом (використовуючи методи теорії поширення пружних хвиль у ступінчастому стрижні, можна показати, що при переході хвилі з одного щабля на інший швидкість її поширення змінюється). Так, при падінні вантажу з висоти 2 м при випробуванні зразків малого поперечного перерізу (порівняно з перетином останнього щабля хвилеводу) гладкі, одно- і двоступінчасті стрижні – хвилеводи забезпечують номінальну швидкість деформування відповідно 12,5; 21,9 та 26,5 м/с (дійсна швидкість відносного переміщення головок зразка дещо нижча).

Незначне зростання швидкості деформування при збільшенні числа щаблів вище двох і зростання рівня напружень на останньому щаблі при поширенні пружної хвилі до границі плинності обмежують застосування зазначеного методу використанням хвилеводу з одним-двома щаблями.

Необхідно відзначити, що час випробування з постійною швидкістю деформування при використанні ступінчастих хвилеводів обмежений часом подвійного пробігу пружної хвилі по довжині останнього щабля хвилеводу, і для підтримки сталою цієї швидкості в процесі випробувань необхідно вміти

правильно розраховувати масу вантажу, а також площу поперечного перерізу кожного шабля хвилеводу, динамометра і зразка.

3.4.4 Пневмопорохові копри

Пневмопорохові копри є балістичними ствольними системами і дозволяють проводити випробування матеріалів при швидкостях зіткнення до 1000 м/с, що викликає виникнення в стрижневих зразках ударних поздовжніх, а в листових - плоских хвиль навантаження [43]. Складний характер поведінки матеріалів в ударних хвилях, пов'язаний з імпульсним поширенням і релаксацією напружень, методичні труднощі реєстрації короткочасних процесів тривалістю в кілька мікросекунд вимагають застосування при високошвидкісному деформуванні найпростіших схем навантаження.

При випробуваннях на розтяг використовуються такі ж, як і на вертикальних копрах, зразки з діаметром робочої ділянки 4 мм і довжиною 10 мм. Випробування проводяться в режимі постійної швидкості деформації ($\dot{\epsilon} = const$) з лінійним її наростанням в початковий період навантаження: при високошвидкісному деформуванні на пневмопорохових копрах енергія ковадла набагато перевищує роботу руйнування зразка і тому процес деформування зразка повністю контролюється рухом ковадла і не переривається відскоками бойка.

Схема копра для випробувань на розтяг наведена на рис. 3.14а.

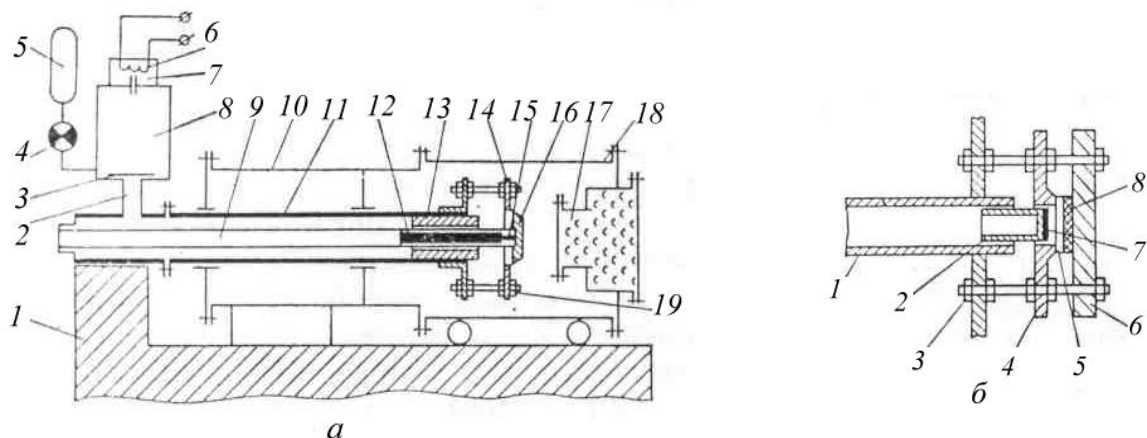


Рис. 3.14 Схема пневмопорохового копра (а) і вузол кріплення зразка, що навантажується плоскою хвилею (б)

Зразок 15, з'єднаний з динамометром 12, знаходиться в жорсткій трубі 9, встановленій в стволі 11. Один кінець труби закріплений в розподільнику повітря 2, а на іншому зафіксовано ковадло 16, за допомогою якого труба центрується щодо осі каналу ствола. Навантажуючий боек-снаряд 13 розга-

няється по каналу ствола стисненим газом і при польоті не стикається з трубою 9, призначеної для захисту розміщених на динамометрі датчиків з кабелями від впливу газів, що розганяють. Вузол навантаження зі зразком розміщені у вакуумній камері копра, яка складається з двох частин. Стационарна частина камери 10, має кабельні вводи для з'єднання укріплених на динамометрі 12 датчиків з реєструючою апаратурою, укріплена нерухомо на станині 1. Рухлива частина камери 18 може відкочуватися по станині, відкриваючи вільний доступ до вузла кріплення зразка. За допомогою перехідного фланця зі стоволом з'єднана камера стисненого повітря 8. Повітря в камеру надходить від балона 5 через вентиль 4 і після досягнення в ній необхідного тиску руйнує діафрагму 3 і розганяє бойок, який при вильоті зі ствола вдаряє по ковадлу і руйнує зразок.

Для запобігання руйнації вакуумної камери вона забезпечена запобіжним клапаном, який спрацьовує при тиску вище 0,1 МПа та забезпечує вихід газів в атмосферу. Перед випробуваннями в камері створюється розрідження з тиском до $1,3 \cdot 10^2$ - $1,3 \cdot 10^3$ Па, достатнім для гасіння ударної хвилі при виході газів з каналу ствола. Розгін бойка стисненим повітрям тиском до 15 МПа дозволяє проводити дослідження при швидкостях від 50 м/с до 300 м/с (швидкість у кожному конкретному випадку залежить від товщини діафрагми, конструкції камери тиску, перехідного фланця, повітророзділювача і схеми їх з'єднання зі стоволом). Для отримання більш високих швидкостей тиск у камері підвищують, спалюючи в камері 7 порох, який займається за допомогою електроспіралі 6. Після руйнування зразка його уламки разом з ковадлом і бойком потрапляють у уловлювач 17.

Великий вплив на результати випробувань при високошвидкісному навантаженні надає площинність удару, для усунення якої необхідно забезпечувати строгую паралельність поверхонь бойка і ковадла. Для центрування ковадла застосовують спеціальний шаблон-циліндр, що встановлюється в канал ствола. Опорну поверхню ковадла встановлюють паралельно торцю снаряда-бойка з точністю до 0,01 мм переміщенням фланця 14 за допомогою гайок 19.

Для дослідження поведінки конструкційних матеріалів у плоскій хвилі навантаження також використовуються пневмопорохові копри, конструкція яких практично не відрізняється від розглянутої.

Плоска пружнопластична хвиля виникає в пластинах при великій швидкості їх зіткнення. Одна з пластин є зразком і нерухомо кріпиться до ковадла, а друга, жорстко з'єднана з бойком, розганяється в каналі ствола пневмопорохового копра (рис. 3.14а). Так як при випробуваннях пластин відпадає необхідність у розміщенні в каналі ствола стрижня-динамометра і захисної

труби, конструкція копрів для ударного навантаження плоскою хвилею за рахунок цієї відмінності дещо спрощується в порівнянні з конструкцією копрів для випробувань на розтяг. Також спрощується конструювання вузла кріплення зразка, показаного на рис. 3.14б. Зразок 5 кріпиться до опорної плити 6 за допомогою гайок і шпильок 3 фланцем 4 через амортизатор 8. Бойок 2 виконується з легкого (алюмінієвого) сплаву у вигляді стакана, до торця якого приклеєна пластина 7 зі сталі або іншого матеріалу. При виготовленні стакана і ствола 1 повинна забезпечуватися висока точність їх діаметрів, що сполучаються, що дозволяє стакану після пострілу плавно ковзати по каналу ствола і виключає можливість розбіжності поздовжніх осей ствола і стакана.

Експериментальні дослідження в даному випадку вимагають також забезпечення високої чистоти поверхонь, що зіштовхуються, і площинності зіткнення. Амплітуда хвилі навантаження при непоганому зіткненні досягає значення, що відповідає значенню при плоскому зіткненні, за умови

$$\frac{d}{c} \geq \frac{\Delta h}{v}, \quad (3.8)$$

де d – діаметр бойка; c – швидкість поширення фронту хвилі навантаження поверхнею; v – швидкість зіткнення; Δh – відхилення від паралельності поверхонь, що зіштовхуються на діаметрі бойка.

При виконанні цієї умови хвиля навантаження поширюється по збуреному поверхневою хвилею матеріалу. У зв'язку з істотним впливом на результати випробувань неплщинності удару при підготовці випробувань особлива увага повинна приділятися дотриманню паралельності поверхонь пластин, що зіштовхуються. Використаний в копрі вузол кріплення дозволяє забезпечити достатню паралельність зразка і закріпленої на торці бойка пластини, при якій перекіс зіткнення, викликаний можливим відхиленням осі стакана від осі ствола і точністю установки опорного ствола, не перевищує 0,03 мм. Як вже зазначалося, співвісність бойка і ствола досягається за рахунок точності їх виготовлення, а опорна поверхня ствола виставляється паралельно поверхні бойка за допомогою гайок мікрометричним індикатором з ціною поділу 0,01 мм.

У копрах для імпульсного навантаження плоскою хвилею можна отримувати при виконанні умови (3.8) швидкості зіткнення пластин від 10 до 1000 м/с [43].

Плоскі ударні хвилі в твердих тілах можна також збуджувати при вибуху на поверхні тіла через тонку пластину з фольги вибухової речовини або при метанні імпульсним електромагнітним полем металевого диска на плоску поверхню тіла.

Вище розглянуті системи силонавантаження забезпечують збудження в об'єктах дослідження таких швидкісних та імпульсних (ударних) навантажень, які дозволяють формувати необхідні режими випробувань ($\dot{\sigma} = const$, $\sigma = const$ і $\dot{\epsilon} = const$), досліджувати при цих режимах поведінку матеріалів у умовах, що піддаються аналізу, напружено-деформованого стану і коректно визначати їх характеристики міцності та пластичності.

У практиці експерименту крім розглянутих знайшли поширення також різні за принципом збудження динамічних навантажень вібростенди і ударні стенди, призначені для дослідження здатності виробів і натурних елементів конструкцій виконувати свої функції в умовах ударних впливів - одиночних і багаторазових, що формують імпульси із заданим законом згасання, що імітують реакцію виробу на удар і т. п. Ці стенди різняться за призначенням, видом відтворюваного ударного навантаження, способами формування ударного впливу, способами отримання необхідних швидкостей зіткнення або розгону. Вони надзвичайно різноманітні за конструктивним виконанням, проте їх поєднує одна загальна ознака – всі вони є складними системами, як правило, із замкнутим контуром регулювання, оснащені сучасною вимірною та керуючою електронною апаратурою. У таких стендах в основному використовуються електродинамічні, електрогідравлічні, пневматичні та гравітаційно-механічні системи збудження навантажень, аналогічні тим, що застосовуються при високошвидкісному динамічному навантаженні зразків та випробуваннях на втому.

Лекція 13. Класифікація систем сило навантаження експериментального обладнання

Лекція 14. Обладнання для випробувань при тривалому статичному і динамічному навантаженнях

Контрольні запитання за розділом 3

1. Які є системи силонавантаження машин для статичних випробувань на короткочасну міцність?
2. Особливості електромеханічних систем.
3. Особливості гідравлічних систем.
4. Особливості гідромеханічних систем.

5. Системи силонавантаження установок для випробування на повзучість та тривалу міцність при $P=\text{const}$
6. Установки з фігурними важільноградієнтними пристроями на повзучість при $\sigma=\text{const}$.
7. Системи установок для випробувань на релаксацію напружень.
8. Зразки Одінга для релаксаційних випробувань.
9. Які є системи навантаження установок для динамічних випробувань?
10. Які бувають копри та їх характеристики?
11. Свольні балістичні системи для при динамічних випробувань.

4 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ

4.1 Класифікація методів дослідження напружено-деформованого стану

4.1.1 Класифікація методів вимірювання

Основними величинами, що входять до визначальних рівнянь механіки деформівного твердого тіла, є напруження і деформації, взаємозв'язок між якими описується на основі дослідних даних, що встановлюються в процесі макроексперименту. Тому вимірюванню напружень і деформацій при експериментальних дослідженнях приділяється дуже велика увага, і в даний час відома велика кількість методів і технічних засобів, що забезпечують визначення цих величин за будь-якого характеру статичного, динамічного та циклічного навантаження в широкому інтервалі температур (1,5 - 1600 К).

Для експериментального дослідження напружено-деформованого стану зразків, моделей і елементів конструкцій і визначення напружень і деформацій використовуються такі методи, що істотно відрізняються за принципами вимірювань [24, 46]:

- рентгено-графічні;
- поляризаційно-оптичні;
- оптично чутливих покриттів;
- крихких покриттів;
- гальванічних покриттів;
- ділільних сіток;
- ліній ковзання;
- муарових смуг;
- голографічної інтерферометрії,
- спекл-інтерферометрії;
- тіньовий оптичний метод каустик;
- термографії (SPATE),
- методи, засновані на перетворенні деформації поверхні за допомогою тензометрів і тензорезисторних перетворювачів.

У сукупності ці методи дозволяють проводити вимірювання деформації в інтервалі значень від 10^{-7} до 1 мм/мм і більше за пружного і пластичного деформування в умовах простого і складного напружених станів.

Нижче для усіх згаданих методів у різних одиницях виміру наводяться граничні значення деформацій, що характеризують їх точність, зв'язок між цими одиницями виміру проілюстровано в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Одиниці вимірювань деформацій

$\varepsilon, \frac{\text{мм}}{\text{мм}}$	1	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
$\varepsilon, \%$	100	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
ОВД*	1×10^6	1×10^5	1×10^4	1×10^3	1×10^2	1×10^1	1.0

*ОВД – одиниця відносної деформації, в англійській літературі «microstrain» – «мікродеформація»; ця величина використовується для позначення малих деформацій, навіть і в нанообласті.

Очевидно, що кожен із зазначених методів має свої переваги та обмеження, які більш детально будуть розглянуті при ознайомленні з особливостями застосування цих методів та їх можливостями. Тут же відзначимо, що тільки методи останньої групи (методи тензометрії) використовуються для вимірювання деформацій і напружень як контрольованих параметрів в установках із замкнутим контуром регулювання. Вимірювальні системи, що базуються на використанні тензометричних методів, в таких установках включають в якості обов'язкових елементів датчики деформації 1, комутатори 2, підсилювачі 3, аналогово-цифрові перетворювачі 4, інтерфейси 5 і обчислювальну машину 6 (рис. (4.1)).

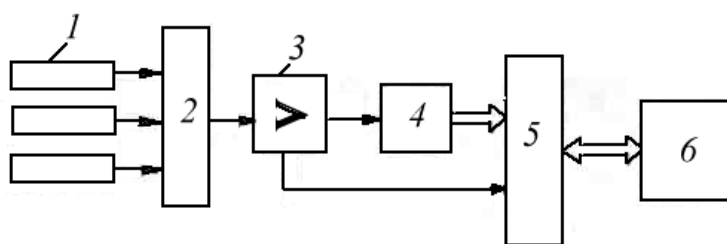


Рис. 4.1 Принципова схема системи вимірювання з використанням тензометрів або датчиків

4.1.2 Рентгенографічні методи вимірювання деформацій

Первинним джерелом інформації про значення вимірюваних величин служать датчики, прикріплені до об'єкта дослідження і які видають у процесі деформування електричний сигнал аналогової (безперервної за часом) форми. Якщо у схемі вимірювання використовується велика кількість датчиків,

вони по черзі підключаються до вимірювального тракту за допомогою комутаторів. Для посилення слабких електричних сигналів, що надходять від датчиків, у схемі передбачені підсилювачі, після яких сигнали можуть подаватися безпосередньо на електронні осцилографи, електронно-механічні самописці для їх запису в аналоговій формі або ПК. Вимірювальні пристрої, що застосовуються в сучасних автоматизованих системах із замкнутим контуром регулювання, мають цифрову індикацію і цифрове подання результатів вимірювань на виході, тому в схемі передбачений аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який перетворює аналогову інформацію на цифрову, що надходить через інтерфейс (пристрій сполучення) в електронно-обчислювальну машину (ЕОМ/ПК). Після обробки інформації в ПК вона видається на графобудівники, пристрої алфавітно-цифрового друку (АЦПУ) або записується на спеціальних носіях для подальшого застосування. Якщо управління експериментом здійснюється за розрахунковим на ПК параметром, відповідні сигнали видаються від ПК через інтерфейс у систему вироблення команд управління. Типи використаних у системах вимірювання установок із замкнутим контуром регулювання датчиків, вимірювальних та перетворюючих приладів та пристроїв будуть детальніше розглянуті при ознайомленні з методами тензометрії.

До загального недоліку тензометричних методів можна віднести те, що з їх застосуванням деформації вимірюються тільки в тому місці, де встановлено датчик або тензометр.

Загальну картину поля напруженого або деформованого стану об'єкта дослідження можуть дати лише такі методи:

- поляризаційно-оптичний;
- крихких, гальванічних та оптично чутливих покриттів;
- сіток, ліній ковзання, муара,
- голографічної інтерферометрії;
- каустик, спекл-інтерферометрії та термографії.

Рентгенівські методи знаходять основне застосування для вимірювання деформацій у металах та сплавах, оскільки явище інтерференції рентгенівських променів, на якому вони засновані, має місце лише у матеріалах із кристалічною ґраткою [24]. При навантаженні об'єкта дослідження відбувається зміна характерних лінійних розмірів кристалічних ґраток, реєстрація яких на рентгенограмах дозволяє визначити її деформацію. Змінюючи напрямок рентгенівських променів, можна вимірювати деформацію в різних напрямках під кутом до поверхні об'єкта дослідження. Розрахунок напружень проводиться за допомогою характеристик пружності за відомим співвідношення закону Гука: $\sigma = E\varepsilon$, де σ - напруження, ε - деформація, E - модуль пруж-

ності. Рентгенографічні методи дозволяють визначати лише пружну складову деформації. Цим вони відрізняються від усіх інших методів вимірювання, за допомогою яких здійснюється вимірювання повної деформації, яка представляє собою суму пружної та пластичної складових.

Таким чином, з використанням рентгенографічних методів можна проводити вимірювання деформацій і напружень у матеріалах з кристалічною структурою при пружному деформуванні в будь-якому напрямку до поверхні об'єкта дослідження. Похибка вимірювання при цьому становить залежно від типу досліджуваного матеріалу від 35 до 150 ОВД.

У зв'язку з тим, що реалізація таких методів вимагає застосування спеціальної рентгенівської апаратури, до недоліків якої можна віднести стаціонарність розміщення, підвищену небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу, а також неможливість здійснення вимірювань безпосередньо в процесі випробувань, ці методи не отримали в практиці макроексперименту достатнього поширення.

4.1.3 Поляризаційно-оптичні методи

Поляризаційно-оптичний метод, або метод фотопружності, ґрунтується на використанні здатності деяких прозорих матеріалів змінювати свої оптичні властивості під дією механічних напружень. У таких спочатку ізотропних матеріалах, як скло і целулоїд, при навантаженні проявляється оптична анізотропія і виникає ефект подвійного променезаломлення. Подвійне променезаломлення пропорційне деформаціям або напруженням прозорого матеріалу. При цьому значення деформації визначаються порядком інтерференційних смуг при просвічуванні зразка, що навантажується, або моделі поляризованим світлом [19, 41, 43].

Явище зміни характеристик подвійного променезаломлення спостерігається як в аморфних прозорих тілах, так і в полікристалах і частково кристалічних матеріалах. У загальному випадку подвійне променезаломлення є оптичною властивістю кристалів, що виражається в розкладанні світлового променя при його проходженні через прозоре кристалічне середовище на дві взаємно перпендикулярні плоскополяризовані складові, які поширюються всередині кристала з різною швидкістю. Прозорі ізотропні матеріали, які під дією навантаження стають анізотропними, поведуться як двоякозаломлюючі кристали. Матеріали, що мають таку властивість, називаються оптично чутливими [19].

Випробування при використанні поляризаційно-оптичного методу, зазвичай, проводяться на прозорих геометрично подібних до досліджуваного

елементу зразків з оптично чутливих матеріалів. До зразка прикладається зовнішнє навантаження і він просвічується поляризованим світлом, промені якого, проходячи через матеріал і спеціальну оптичну систему, дають на екрані картину моделі з чітко вираженими кольоровими або темними (у монохроматичному освітленні) смугами (рис. 4.2а). Виникнення таких смуг є наслідком зміни оптичних властивостей матеріалу та подвійного променезаломлення під дією механічних напружень.

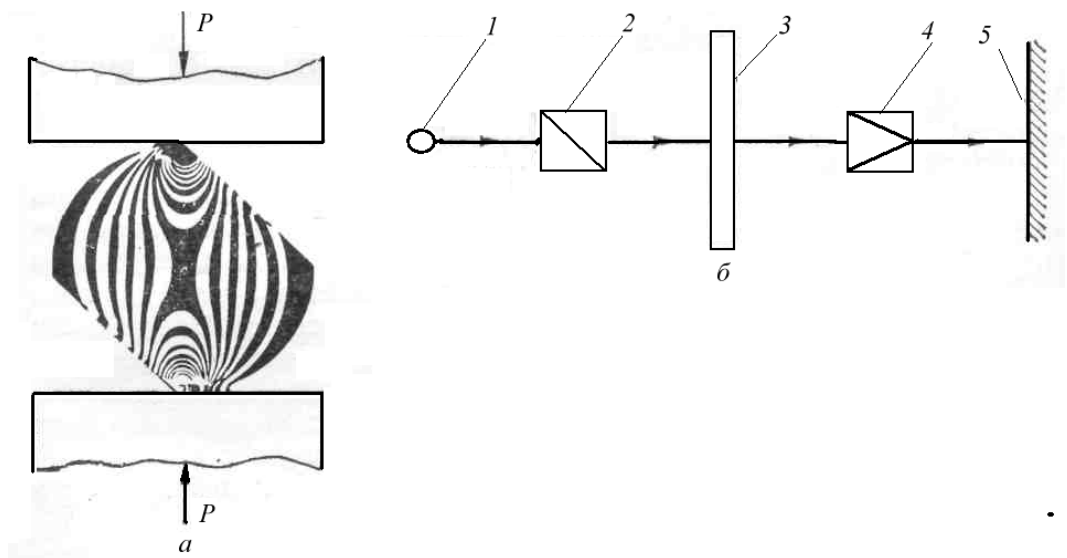


Рис. 4.2 Картина смуг у диску, стиснутому зосередженими силами вздовж діаметра (а) і принципова схема поляризаційно-оптичної установки (б).

Поляризоване світло є світловою хвилею з упорядкованим напрямом коливань. Для отримання поляризованого світла застосовують дзеркала, що відображають, поляризаційні призми і поляроїдні плівки.

Застосування поляризаційно-оптичного методу передбачає використання матеріалів, що відповідають закону Гука, тобто таких матеріалів, у яких деформація пропорційна напруженням. При лінійному напруженому стані прозорий матеріал набуває властивостей оптично одновісного кристала з оптичною віссю, паралельній головній осі напружень, а при плоскому напруженому стані матеріал стає оптично двовісним. Для визначення величини подвійного променезаломлення, що виникає при деформуванні прозорого матеріалу, використовується явище інтерференції поляризованих променів.

Поляризований промінь світла при вході в пластинку, що знаходиться в плосконапруженому стані, розщеплюється на два промені, які проходять через оптично чутливий матеріал з різними швидкостями. Площини поляризації цих двох променів збігаються з площинами основних напружень. Відставання одного променя від іншого, яке визначає величину лінійної різниці хо-

ду δ , пропорційне відносному оптичному коефіцієнту C , товщині пластини d та різниці головних напружень σ_1 і σ_2 :

$$\delta = Cd(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4.1)$$

де $C = C_1 - C_2$, а C_1 і C_2 - оптичні коефіцієнти, які характеризують для даного матеріалу залежність між подвійним променезаломленням і напруженнями.

Співвідношення (4.1) виражає основний закон, що використовується в поляризаційно-оптичному методі (закон Вертгейма), який описує кількісний зв'язок між оптичним ефектом та різницею головних напружень $\sigma_1 - \sigma_2$.

Лінійну різницю ходу δ і напрямки головних напружень σ_1 і σ_2 визначають при просвічуванні плоскої моделі у спеціальних оптичних приладах, які називаються полярископами.

Розрізняють плоскі та кругові полярископи. Плоский полярископ в якості основних елементів містить джерело світла, поляризатор, аналізатор, систему лінз і екран; його схему наведено на рис. 4.2б. Підвантажена модель 3 встановлюється в робочому полі полярископа між поляризатором 2 та аналізатором 4. Промінь світла від монохроматичного джерела 1 надходить у поляризатор, після проходження якого світло стає плоскополяризованим. Далі поляризоване світло проходить через модель, розщеплюється на два промені з різницею ходу, які надходять у аналізатор, що пропускає аналогічно поляризатору світлові коливання лише в одній площині.

Для визначення різниці ходу δ – основної величини, що характеризує напружений стан моделі, використовується явище інтерференції світла. Аналізатор служить для суміщення в одній площині зі зсувом фаз коливань двох світлових хвиль, що виходять із моделі. На виході з аналізатора формується інтерференційна картина, яка проектується на екран 5. Такі інтерференційні картини в межах контуру моделі називають картинами смуг або **ізохром** (точки, що належать одній смузі або ізохромі, мають однакову різницю ходу δ і однакову різницю головних напружень і відповідають зонам моделі, в яких діють постійні дотичні напруження).

Реєстрація картини смуг зазвичай здійснюється за допомогою фото або кіноапаратури.

Круговий полярископ відрізняється від плоского тим, що в оптичній схемі, наведеній на рис. 4.2б між поляризатором і моделлю, моделлю і аналізатором додатково встановлюють так звані чвертьхвильові пластинки, що створюють зсув фаз коливань світлових хвиль на чверть довжини хвилі. Завдяки цьому в робочому полі полярископа здійснюється кругова поляризація світла і на зображенні моделі в монохроматичному світлі спостерігаються світлі та темні смуги різних порядків, що характеризують напружений стан

моделі (при монохроматичному світлі **ізохром**и представляють собою темні смуги, при білому світлі - кольорові смуги).

Залежність між напруженнями і порядком смуг описується співвідношенням у вигляді

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\delta}{Cd} = \frac{n\lambda}{Cd} = n\sigma_0, \quad (4.2)$$

де σ_0 - оптична постійна моделі (ціна смуги), яка залежить від матеріалу, товщини моделі, довжини хвилі світла λ ; $\sigma_0 = \lambda / Cd$; n - порядок смуги, ціле додатне число.

Ціну смуги можна також визначити для максимального дотичного напруження у вигляді

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{n\lambda}{2Cd} = n\tau_0, \quad (4.3)$$

де τ_0 - оптична постійна (ціна смуги) по максимальним дотичним напруженням, $\tau_0 = \lambda / 2Cd$.

При проходженні світла через ділянки моделі, у яких напрямом одного із головних напружень паралельний площині поляризації поляризатора, відбувається повне гасіння світла незалежно від значення різниці ходу. У цьому випадку на зображенні моделі з'являються темні лінії, які з'єднують точки з однаковими напрямками головних напружень. Ці лінії називаються **ізоклінами**. При спільному повороті поляризатора і аналізатора у круговому полярископі ізокліни також змінюють своє положення. Побудоване для різних кутів нахилу поле ізоклін характеризує напрямом головних напружень в різних точках моделі. Якщо використовується монохроматичне джерело світла, ізокліни важко відрізнити від смуг, тому для отримання ізоклін застосовуються джерела білого світла. У плоскому полярископі з таким джерелом ізокліни спостерігаються у вигляді темних смуг на тлі кольорової картини. Поле ізоклін використовується для графічної побудови траєкторій головних напружень (**ізостат**) - ліній, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком одного з головних напружень. Ізостати для двох головних напружень утворюють систему ортогональних кривих, що дають наочне уявлення про характер поля напружень.

Різниця ходу δ , яка використовується відповідно до співвідношення (4.2) і (4.3) для визначення головних напружень, може бути встановлена із застосуванням двох методів - методу компенсації та методу смуг [19].

Методи компенсації відрізняються підвищеною точністю. Їх принцип реалізації ґрунтується на гасінні за допомогою спеціальних компенсаторів світла в тій зоні (точці) моделі, де необхідно визначити різницю ходу. В яко-

сті компенсаторів використовуються спеціальні зразки з оптично чутливого матеріалу, які встановлюються перед моделлю, а саме: аналізатори полярископа; чотирьохвильові пластини, кварцові клини, подвійні склеєні пластини та інші оптичні пристрої, що встановлюються в оптичній схемі полярископа.

У всіх методах компенсації вважаються відомими напрямки головних напружень. Розглянемо, як практично застосовуються методи компенсації на прикладі використання механічних компенсаторів, що представляють собою розтягнуті або стиснені зразки з оптично чутливого матеріалу. Навантажуючи такий зразок, встановлений перед моделлю, можна створювати оптичну різницю ходу, рівну за значенням і зворотну за знаком різниці ходу променів в моделі. Момент компенсації, що відповідає рівності нулю загальної різниці ходу в моделі та зразку, визначається по гасінню світла в заданій точці (області) моделі. Різниця ходу променів у моделі при цьому визначається за відомими напруженнями в компенсаторі, його розмірах та оптичним властивостям матеріалу. Розтягуючи і стискаючи зразок, можна також визначити напрямок кожного з головних напружень окремо.

Метод смуг є більш простим порівняно з розглянутим і менш точним. Ним рекомендується користуватися при дослідженні моделей, виготовлених із матеріалів з високою оптичною чутливістю. Отримана на екрані при монохроматичному джерелі світла картина смуг фотографується, а потім за відбитками визначається їх порядок і будуються графіки зміни порядків смуг уздовж обраних перерізів, якими можна встановити величину порядку в кожній точці.

Для правильного підрахунку порядку смуг необхідно спостерігати за процесом їх формування при навантаженні моделі або встановлювати точку відліку, що відповідає ненавантаженим зонам моделі, в яких розташовані смуги нульового порядку. Так, вільно виступаючі кути в моделі незначно навантажені, порядок смуги в них зазвичай дорівнює нулю, і тому вони можуть використовуватися як область початку відліку порядку смуг.

Метод фотопружності базується на використанні спеціальних оптично чутливих матеріалів, до яких висуваються підвищені вимоги щодо деяких оптичних та механічних властивостей: вони повинні мати високу прозорість, стабільні оптико-механічні характеристики, достатню міцність, хорошу технологічність; повинні бути оптично і механічно ізотропними, мати малий крайовий ефект за часом, пов'язаний з появою подвійного променезаломлення в поверхневих шарах ненавантаженої моделі.

В даний час відома досить велика кількість матеріалів з різноманітними оптико-механічними властивостями, які використовуються при поляризаційно-оптичних дослідженнях. До них насамперед можна віднести полімерні

матеріали на основі епоксидних смол, фенолформальдегідних смол, поліефірних смол; поліуретанові каучуки; полікарбонат; органічне скло; целулоїд [19]. Найбільшого поширення набули при цьому епоксидні смоли та полікарбонат.

Слід зазначити, що застосування поляризаційно-оптичного методу не обмежується плоскими моделями, а також умовами статичного навантаження та пружного ізотермічного навантаження. Відомі методи дослідження на об'ємних моделях, у тому числі обертальних, а також методи дослідження задач пластичності, термопружності, повзучості та динамічних задач на прозорих моделях поляризаційно-оптичним методом. Поєднання цих методів і методів муара дає можливість вирішувати дуже складні задачі з дослідження напружень у зонах концентрації напружень у тілах складної форми, що навантажуються за складними програмами.

Для дослідження методами фотопластичності напруженого стану моделей при пружнопластичному деформуванні використовуються полімерні і кристалічні матеріали. Вибір матеріалу для моделі залежить від ступеня подібності його поведінки при пластичному деформуванні поведінки матеріалу натурального елемента. Найбільше застосування у фотопластичності отримали такі полімери, як целулоїд, полістирол і полікарбонат.

Зазначимо, що останнім часом для вивчення повзучості на моделях з оптично активних матеріалів набули розвитку так звані методи фотоповзучості. Їх використання в основному базується на застосуванні для виготовлення моделей целулоїду, повзучість якого при лінійному і плоскому напружених станах в умовах розтягу відповідає тим самим закономірностям, що і повзучість металів і сплавів при підвищених температурах.

Таким чином, *до переваг* поляризаційно-оптичних методів слід віднести їх універсальність стосовно умов навантаження і деформування матеріалу і можливість кількісної оцінки напружень по всій поверхні об'єкта дослідження. Ці методи дозволяють за наявності необхідної оптичної апаратури, випуск якої налагоджений промисловістю, порівняно просто отримувати наочні картини, що характеризують напружений стан моделей елементів конструкцій складних геометричних контурів і навантажених за складними схемами. Використання стробоскопічного ефекту дозволяє також дуже ефективно застосовувати ці методи для дослідження напруженого стану деталей, що швидко обертаються, і для оптимізації їх конструктивних форм. Ці методи дають на відміну від інших наочну картину не полів деформацій, а полів напружень, що особливо важливо для процесів повзучості і пластичності.

До їхнього основного недоліку слід, перш за все, віднести те, що вимірювання проводять не на об'єктах, а на моделях і перехід від остан-

ніх до перших пов'язаний з великими методичними труднощами через недостатню розробленість питань теорії подібності та моделювання для твердих тіл, що деформуються.

Досі залишається складною техніка експерименту на об'ємних моделях. Великі проблеми також зустрічаються при поширенні поляризаційно-оптичних методів на область дослідження великих пластичних деформацій при активному деформуванні та повзучості. (1000 ОВД)

4.1.4 Метод оптично чутливих покриттів

Цей метод є модифікацією поляризаційно-оптичного методу та дозволяє подолати його основний недолік, пов'язаний із необхідністю проведення досліджень на прозорих моделях. Метод оптично чутливих покриттів застосовується для вивчення напружено-деформованого стану непрозорих елементів конструкцій, на поверхню яких наноситься тонкий шар оптично чутливого матеріалу. У цьому випадку картина смуг, що формується, досліджується у відбитому світлі, а не проходить через оптично прозорий матеріал, як при використанні поляризаційно-оптичного методу в його класичному варіанті.

Метод оптично чутливих покриттів забезпечує можливість дослідження кінетики полів напружень і деформацій в натурних конструкціях з суттєво неоднорідним напруженим станом при силовому та тепловому статичному та динамічному навантаженні в умовах активного пружнопластичного деформування та повзучості. До теперішнього часу питання практичного застосування цього методу є досить розробленими, промисловістю освоєно випуск різних типів приладів для його реалізації та успішно використовується в лабораторних, промислових і польових умовах для дослідження моделей і реальних конструкцій [19].

Принцип застосування методу заснований на тому очевидному експериментально підтверженому факті, що у зв'язку з малістю товщини покриття розподіл напружень по товщині можна вважати рівномірним, а напружений стан покриття - плоским. Тому його деформації при навантаженні повністю збігатимуться з деформаціями поверхні досліджуваного об'єкта і зв'язок між ними та оптичними характеристиками матеріалу покриття запишеться у вигляді

$$\varepsilon_1^k - \varepsilon_2^k = \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p = \frac{m\varepsilon_0}{2h^p}, \quad (4.4)$$

де m - порядок ізохром (смуги); h^n - товщина покриття; ε_0 - ціна смуги матеріалу покриття за деформаціями; ε_1 и ε_2 - головні деформації, індекси n і k відносяться відповідно до покриття і конструкції.

Отже, для оцінки деформованого стану об'єкта дослідження з використанням співвідношення (4) по різниці головних деформацій $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ та їх напрямку необхідно отримати в процесі експерименту дані про поля ізохром і ізоклін, а також визначити їх порядок, що виконується технічно так само, як при використанні поляризаційно-оптичного методу. Зазначимо тільки, що на відміну від останнього в методі покриттів оперують не з напруженнями, а з деформаціями. Якщо покриття працює у пружній області, то практично нескладно, використовуючи характеристики пружності, перейти від оцінки деформованого стану до напруженого; розв'язання такого завдання при нелінійному зв'язку між напруженнями та деформаціями дуже складне.

Таким чином, чутливість методу оптично чутливих покриттів за деформаціями залежить від оптико-механічних характеристик та товщини матеріалу покриття, а чутливість по напруженнях - ще й від пружних характеристик матеріалу покриття та конструкції, на яку воно нанесене. При дослідженні напружено-деформованого стану в цьому випадку так само, як при використанні базового методу фотопружності застосовують методи смуг і компенсації.

При дослідженні пружних деформацій для виготовлення покриттів використовуються матеріали на основі епоксидних смол або поліуретанові каучуки, режими полімеризації яких аналогічні застосованим при виготовленні оптично прозорих моделей в базовому поляризаційно-оптичному методі. Покриття, що використовуються для дослідження пластичного деформування елементів конструкцій, повинні задовольняти ряду специфічних і часто суперечливих вимог. Вони повинні мати високу чутливість за деформаціями, це необхідно для отримання достатньої для розшифровки кількості смуг у малонавантажених областях, при цьому їх пластичність має бути значно більшою, ніж реалізована в матеріалі конструкції при випробуваннях.

Реальні конструкції характеризуються наявністю концентраторів напружень, у яких при навантаженні виникають високі градієнти деформацій та напружень. Щоб уникнути великих похибок покриття повинні мати мінімальну товщину і досить високу адгезію до матеріалу основи. Перерахованим вимогам найбільш повно відповідають покриття на основі *епоксидних смол*, які отримують гарячою полімеризацією. Середня деформація таких покриттів досягає 20 %, а максимальна місцева - до 20-50 %.

При дослідженні реальних конструкцій з великою площею поверхні найчастіше застосовується не монолітне покриття, а спеціальні фотопружні датчики, у яких в якості вимірювального елемента служить пластинка з оптично чутливого матеріалу. В даний час відома велика кількість різноманітних конструкцій таких датчиків, з яких найбільшого поширення набули лінійні та кільцеві. Лінійний датчик представляє собою пластинку 2 прямокутного перерізу постійної товщини з оптично чутливого матеріалу, довжина якої значно більша за її ширину, рис. 4.3.

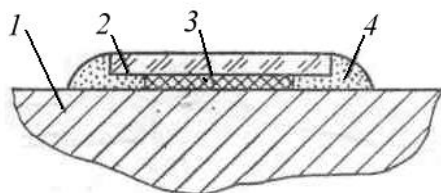


Рис. 4.3 Схема установки фотопружного датчика

Датчик кінцями прикріплюється до об'єкта 1 за допомогою клею 4, у центральній частині він підтримується гумовим шаром 3. Якщо датчик встановлений таким чином, що його вісь збігається з напрямком однієї з головних деформацій, у його центральній частині при навантаженні формується однорідний напружено деформований стан. Оптична різниця ходу у процесі випробувань визначається візуально чи за допомогою портативних полярископів. Для вимірювання деформації в перпендикулярному напрямку необхідно використовувати ще один датчик. Деформація відповідає деформації об'єкта на базі 1.

Кільцеві датчики є круглими пластинами постійної товщини, призначені для визначення напрямку і величини головних деформацій на поверхні натурної конструкції. Головні напрями визначаються за напрямом осей симетрії картини смуг у датчику, із якими вони збігаються, а головні деформації обчислюються за результатами виміру оптичної різниці ходу вздовж осей симетрії. На поверхні таких датчиків можуть наклеюватися поляроїди для візуального відліку порядку смуг. Процес вимірювань спрощується при використанні кільцевих датчиків із попередньо «замороженою» картиною смуг у вигляді концентричних кіл. При деформуванні ці кола перетворюються на еліпси, розміри та напрями осей яких визначають значення та напрями головних деформацій.

Для вимірювання в оптично чутливих покриттях характеристик інтерференційних картин використовуються полярископи односторонньої дії, які за

оптичними схемами можна розділити на три основні типи [19]: V-подібні (рис. 4, а), Т-подібні (рис. 4.4б) та похилого просвічування (рис. 4.5).

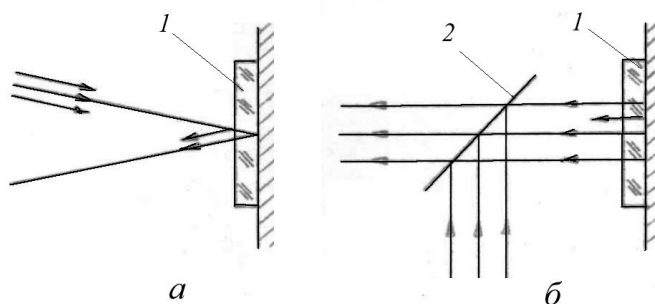


Рис. 4.4 Схема ходу променів та покриттів для V-подібного (а) та Т-подібного (б) полярископів

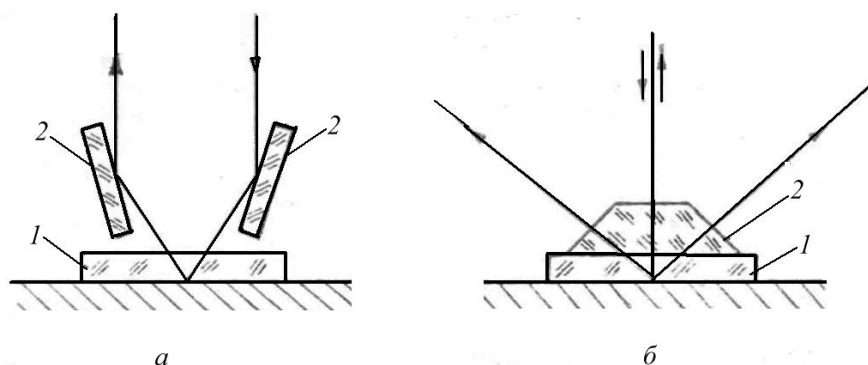


Рис. 4.5. Безконтактна (а) та контактна (б) схеми похилого просвічування

У всіх цих приладах можна виділити два основних вузли: вузол поляризатора, до складу якого входить джерело світла, теплофільтр, світлофільтр, поляризатор (поляроїд), чвертьхвильова пластинка і лінза, а також вузол аналізатора, що складається з чвертьхвильової пластинки, аналізатора (поляроїда) та лінз. До складу приладів також входять екран або пристрій реєстрації. В якості джерела світла зазвичай застосовуються ртутні, натрієві і кадмієві лампи, лампи розжарювання, а останнім часом - і оптичні квантові генератори.

У полярископах V-подібного типу оптичні шляхи падаючого та відбитого променів не збігаються і кут між ними становить 6-15° (рис. 4.4а). Тому на ділянці між точками входу та виходу променів з покриття 1 відбувається усереднення оптичного ефекту, що при великих товщинах покриттів і високих градієнтах деформацій, що зумовлюють формування великої кількості смуг, може призвести до накладання смуг та утворення суцільного сірого фону. Для покриттів невеликої товщини можна вважати, що падаючий і відбитий

промені проходять через ту саму точку покриття. Переваги таких установок – малі втрати світла під час проведення випробувань.

У полярископах Т-подібного типу падаючий і відбитий промені проходять через ту саму точку покриття 1 (рис. 4.4б). Світловтрати за такої схеми ходу променів у напівпрозорому дзеркалі 2 становлять до 50 %. У цих полярископах різниця ходу в точці вимірюється з більшою точністю, ніж у V-подібних, проте техніка їх експлуатації та обслуговування значно складніша.

Оптичні схеми для похилого просвічування поділяють на контактні та безконтактні. У безконтактній схемі використовуються два дзеркала 2, за допомогою яких просвічуються покриття 1 (рис. 4.5а), а в контактній - тригранна призма 2, виготовлена з матеріалу з коефіцієнтом заломлення, рівним коефіцієнту заломлення матеріалу покриття 1 (рис. 4.5б).

Найбільшого поширення у практиці вимірювань отримали V-подібні полярископи. Конструктивно вони, як правило, випускаються у вигляді переносних компактних приладів, що дозволяють виконувати оперативний аналіз деформацій у різних точках досліджуваної конструкції. Полярископи оснащуються пристосуваннями для компенсаційних вимірювань і фотографування картини смуг ізохром та ізоклін. Для дослідження криволінійних поверхонь у конструкцію полярископа вбудовуються механічні пристрої, що забезпечують суміщення осі полярископа з нормаллю до поверхні об'єкта в кожній точці поля.

4.1.5 Метод крихких покриттів

Цей метод є простим і ефективним методом експериментального дослідження деформацій і напружень. Він забезпечує рішення, які не вимагають високої точності інженерних завдань визначення траєкторії головних напружень (деформацій) в точках поверхні елементів конструкцій складної геометричної форми будь-якого матеріалу за допомогою спеціальних покриттів, руйнування яких відображає напружено-деформований стан досліджуваної поверхні. Ідея методу полягає в тому, що на поверхню досліджуваної деталі наноситься тонким шаром покриття із заданими характеристиками. Висока крихкість покриття після висихання і твердіння пояснюється тим, що в ньому виникають залишкові напруження, які завдяки хорошій адгезії між покриттям і деталлю сприяють навіть при незначних деформаціях утворенню сітки тріщин. При цьому тріщини в покритті розташовуються перпендикулярно до найбільших деформацій.

Матеріал покриття вибирається таким, щоб лінії розриву утворювалися в покритті при напруженнях в досліджуваній конструкції, менших границі

пропорційності матеріалу конструкції. Тому метод крихких покриттів вважається неруйнівним методом аналізу напружено-деформованого стану. За результатами застосування цього методу може бути отримана найбільш раціональна схема розміщення більш точних засобів вимірювань на конструкції складної геометричної форми, що характеризується суттєвою неоднорідністю напруженого стану та високими градієнтами напружень. Таке застосування методу крихких покриттів для оціночних вимірювань обумовлено тим, що похибка визначення деформацій і напружень на основі його використання досягає 10-20% і точніші результати можна отримувати лише за допомогою інших засобів тензометрування.

Необхідно, щоб тріщини у покритті виникали не миттєво, а поступово, прямуючи за безперервною зміною навантаження. Тому в процесі випробувань при використанні методу крихких покриттів важливо не тільки отримати остаточну картину тріщин, не менш важливо спостерігати послідовність їх виникнення та розвиток зі збільшенням та зменшенням зовнішніх навантажень. Застосування методу крихких покриттів має забезпечити, по-перше, встановлення зв'язку між картиною тріщин і напружено-деформованим станом покриття і, по-друге, визначення напружень та деформації на поверхні об'єкта за цими даними [19, 27, 43]. Товщина покриття, як правило, набагато менша товщини досліджуваних елементів конструкції, а міцність покриття також суттєво нижча, тому можна вважати, що деформації по товщині покриття розподілені рівномірно і дорівнюють деформаціям на досліджуваній поверхні. Покриття руйнується, якщо деформації досягають деякого критичного значення, яке називають граничною деформацією або постійною крихкого покриття і визначають з випробувань на тарування [19]. Значення головного напруження, що діє на поверхні об'єкта при лінійному напруженому стані перпендикулярно до тріщин, можна визначити зі співвідношення

$$\sigma_1^M = E^M \varepsilon_p = \frac{E^M}{E^П} \sigma_p, \quad (4.5)$$

де E^M , $E^П$ - відповідно модулі пружності матеріалу об'єкта дослідження і покриття; σ_1^M , σ_p - діючі в об'єкті і покритті напруження.

Це рівняння має широке практичне застосування, проте воно не враховує впливу другого головного напруження та реального розподілу напружень у конструкції і тому може давати завищені значення σ_1^M .

Зазвичай прагнуть підібрати таке покриття, яке б руйнувалося при заданому значенні ε_p . Якщо значення ε_p не є критерієм руйнування покриття, то об'єкт дослідження найчастіше навантажують до максимального навантаження з тим, щоб на більшій площі поверхні отримати лінії розриву, які

визначають напрям головних напружень. Отримана при цьому картина системи тріщин або фотографується, або наноситься на креслення деталі. Вона дає якісне уявлення про найбільш навантажені ділянки конструкції, проте в цьому випадку **не можна розрахувати діючі напруження**.

Більш повні дані метод крихких покриттів дозволяє отримати, коли матеріал покриття руйнується при певному значенні ε_p . Для таких покриттів кількісна оцінка напружень, що виникають у конструкції, виконується з використанням рівняння (4.5).

Характер картини тріщин, що виникають у крихкому покритті, залежить від схеми напруженого стану досліджуваного об'єкта і від умов навантаження. Залежно від співвідношення головних напружень σ_1 і σ_2 , що діють у покритті, для умов пропорційного навантаження можна виділити три основні випадки (рис. 6) [19].

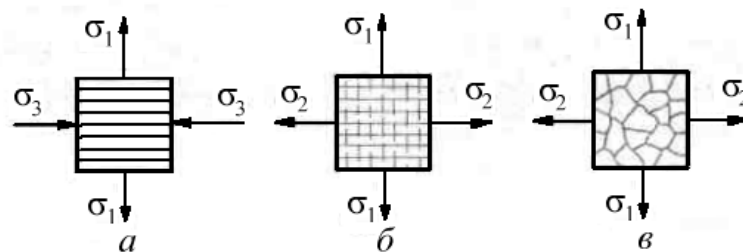


Рис. 4.6. Типові картини тріщин в крихких покриттях:

a - головні напруження протилежних знаків; *б* - головні напруження одного знаку при $\sigma_1 > \sigma_2$; *в* - головні напруження розтягу рівні між собою

1. $\sigma_1 > 0, \sigma_3 < 0$. За такого напруженого стану утворюється лише одне сімейство тріщин, перпендикулярних до напрямку головного напруження σ_1 та паралельних σ_3 . Отримана картина тріщин визначає напрямок головного напруження σ_3 на поверхні конструкції і збігається з полем ізолат (рис. 4.6а). Аналогічна картина тріщин характерна для елементів конструкцій, що працюють на розтяг, кручення та згин. Друге сімейство ізолат можна одержати у вигляді картини тріщин при розвантаженні об'єкта дослідження, на який покриття нанесено в навантаженому стані.

2. $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$. За такого співвідношення головних напружень за пропорційного навантаження спочатку утворюються перпендикулярні до напрямку головного напруження σ_1 тріщини (рис. 4.6б), що викликають зміну напружено-деформованого стану покриття, яке трансформується з плоского в квазілінійне і втрачає чутливість до зміни σ_1 . Тому при збільшенні навантаження і досягненні напруженням σ_2 границі міцності покриття утворюється

друге сімейство тріщин, паралельних напрямку головного напруження σ_1 , тобто в розглянутому випадку можна отримати обидва сімейства ізостат. Така картина тріщин спостерігається при навантаженні товстостінних і тонкостінних циліндрів внутрішнім тиском. При зростанні тиску перші тріщини лежать на поверхні циліндра утворюються спочатку у осьовому напрямку, а потім в окружному.

3. $\sigma_1 \approx \sigma_2 > 0$. Це випадок всебічного розтягу, для якого коло Мора вироджується в точку і в усіх напрямках діють напруження, рівні головним. Орієнтування тріщин у цьому разі носить випадковий характер і дуже чутливе до анізотропії властивостей матеріалу покриття. Картина тріщин такого типу (рис. 4.6в) зазвичай виникає у сферичних елементах конструкцій, навантажених внутрішнім тиском.

Значення головних напружень при довільному робочому навантаженні можна визначити із співвідношення $\sigma = \sigma_p \frac{P}{P_p}$, де σ_p - напруження, що відповідає навантаженню P_p , за якого відбувається руйнування покриття; σ - напруження, що відповідає робочому навантаженню P .

В якості крихких покриттів широко застосовуються такі види покриттів, як рідке та тверде покриття на основі каніфолі, емалеве (керамічне), природні та клейкі плівки [19, 27]. Вони наносяться на об'єкти дослідження пензликом, наливом, зануренням, розпорошенням, наплавленням або газополум'яним напиленням, а також утворюються на поверхні об'єкта при нагріванні металу та за електрохімічної обробки.

Найбільшого поширення на практиці вимірювань отримали каніфольні покриття з розчинником, які наносяться в рідкому стані (лак); каніфольні покриття без розчинника, що наносяться на поверхню наплавленням або газополум'яним напиленням; емалеві покриття для досліджень при підвищених температурах, які отримані шляхом оплавлення при нагріванні з деталлю. Тензочутливість крихких покриттів і точність оцінки напружень залежать від їх типу і стану, умов і способів нанесення, умови формування покриття на поверхні елемента конструкції (температури та вологості, режиму термообробки, умов затвердіння), умов випробування та характеру напруженого стану у місці утворення тріщин, тобто від великої кількості факторів, врахування яких повинно базуватися на ретельній обробці технології отримання покриттів, на результатах проведення обов'язкових тарувань та на забезпеченні відповідності певних типів покриттів певним умовам випробувань. У загальному випадку тензочутливість крихких покриттів змінюється в межах 0,02-0,2%.

Стабільністю властивостей характеризуються покриття, що представляють собою природні і крихкі клеєві плівки. В якості крихких клейких покриттів застосовуються оксидні покриття, нанесені на алюмінієву фольгу, яка за допомогою ціакринового або епоксидного клею приєднується до досліджуваної ділянки деталі.

Вибір конкретного типу крихкого покриття для оцінки напружено-деформованого стану елемента конструкції або деталі залежить від їх габаритних розмірів, температури випробувань, характеру навантаження, а також рівня діючих навантажень і граничних деформацій, що розвиваються в матеріалі основи. Якщо випробування проводяться за температур нижче 323 К, можна використовувати будь-які покриття; за температур до 473 К слід застосовувати оксидні та емалеві покриття, а при вищих - тільки емалеві. При помірних низьких (до 271 К) температурах працездатність зберігають покриття на каніфольній основі, при дуже низьких кліматичних температурах до 223 К найбільш доцільним для використання є клейкі оксидні покриття.

Метод крихких покриттів останнім часом знаходить все більше поширення завдяки ряду переваг порівняно з іншими методами дослідження напружено-деформованого стану моделей та натурних конструкцій. Насамперед він не вимагає складного приладового забезпечення вимірювань і відрізняється простотою обробки первинних експериментальних даних. Цей метод характеризується наочністю отриманої для великої площі деталі інформації про поля деформацій та можливістю її безпосереднього врахування при візуальному спостереженні. І нарешті, з використанням методу крихких покриттів можна досліджувати об'єкти практично будь-якої геометричної форми при різних режимах навантаження в широкому інтервалі температур (223-623 К) в умовах суттєво неоднорідного напруженого стану при мінімальних значеннях вимірюваних деформацій.

4.1.6 Метод гальванічних покриттів

Метод гальванічних покриттів - це єдиний метод, призначений для якісної оцінки ступеня пошкодженості металу в різних зонах неоднорідно напруженої деталі при її циклічному навантаженні. Принцип визначення найбільш напружених зон у деталях при їх повторному деформуванні базується на експериментально встановленому факті утворення на поверхні мідних гальванічних покриттів темних плям після тривалого навантаження. Якщо таке покриття нанести на деталь, що працює на втому, то найбільше потемніння покриття буде відповідати тим ділянкам, в яких накопичення пошкоджень відбувається найбільш інтенсивно і є осередком руйнування де-

талі. Розмір і колірна інтенсивність плям збільшуються зі збільшенням числа циклів навантаження і зростанням амплітуди напружень. Причому в початковий момент дії навантаження в покритті спостерігається поява обмеженої кількості дуже слабких плям. У процесі напрацювання поряд із зміною їх розмірів та колірної інтенсивності відбувається утворення та розвиток нових плям. Тому за певного досвіду по картині плям і характеру їх зміни можна приблизно оцінювати ступінь пошкодженості деталі, напрацьований ресурс і визначати можливі зони руйнування. Товщина покриття не перевищує 10 мкм, тому його деформація відповідає деформації об'єкта дослідження, а невеликі зміни товщини покриття практично не впливають на результати випробувань.

Поява темних плям пов'язана зі змінами у структурі тонких мідних плівок, отриманих гальванічним способом. Плями утворюються не внаслідок зміни механічного стану гальванічного покриття, а обумовлені рекристалізацією та окисненням [19]. Передбачається, що між дрібними зернами покриття міститься невелика кількість електроліту, який використовується для отримання покриття. Електроліт при циклічному навантаженні в результаті рекристалізації та зростання зерен витісняється на їх вільну поверхню. Оксидна плівка на поверхні шару дуже чутлива до кислоти, і тому внаслідок корозійної втоми виникають темні плями. Їх розмір залежить від режиму термічної обробки після утворення покриття, температури електроліту та його складу; на розмір плям впливає режим навантаження, тривалість випробувань та рівень діючих навантажень. Якщо відомо число циклів навантаження, то мінімальні напруження, що відповідають появі плям, визначаються модулем пружності матеріалу досліджуваного елемента конструкції, хімічним складом електроліту і технологією його нанесення.

При використанні методу гальванічних покриттів необхідно попередньо провести випробування тарування, за результатами яких встановлюється залежність для застосованого електроліту між розміром плям, їх колірною інтенсивністю, діючими напруженнями (деформаціями) і числом циклів навантаження.

Мідне гальванічне покриття наноситься безпосередньо на об'єкт, що досліджується, в гальванічних ваннах або до цього об'єкта кріпляться датчики, виготовлені з мідної гальванічної фольги. У першому випадку в процесі циклічного навантаження картина плям формується по всій поверхні об'єкта і можна оцінювати його напруженість в цілому, у другому - отримана за допомогою датчика інформація характеризує стан об'єкта матеріалу тільки в зоні закріплення датчика.

Для отримання високоякісного гальванічного покриття необхідно спеціально готувати поверхню деталей. Спочатку вона шліфується, потім після обробки в слабкому розчині кислоти та знежирення вуглекислим кальцієм її попередньо покривають у лужній ванні міддю. Основний шар міді наноситься у кислій ванні. Електрична схема пристрою нанесення гальванічного покриття показана на рис. 7 [19].

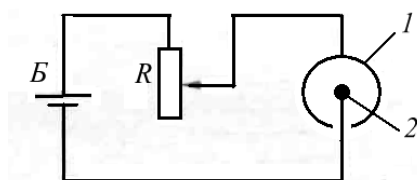


Рис. 4.7 Електрична схема пристрою для нанесення гальванічного покриття

Для нанесення першого шару покриття в лужній ванні використовується такий склад електроліту: CuCN - 23 г, NaCN - 30 г, Na_2CO_3 - 10 г, дистильована вода - 1000 мл; щільність струму у ванні 6 А/м^2 , температура 303 К, час нанесення покриття 20 хв. Другий шар покриття наноситься в такому електроліті: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - 250 г, H_2SO_4 - 80 г, дистильована вода - 1000 мл; щільність струму у ванні 300 А/м^2 , напруга 0,5 В, час нанесення покриття 15 хв. Живлення в електричній схемі гальванічного пристрою здійснюється від джерела постійного струму B . За допомогою реостату R регулюється напруження у ванні, в якій в електроліті розміщені катодна мідна пластинка 1 і анод - деталь 2 , на яку наноситься гальванічне покриття.

Термін зберігання деталей з нанесеним гальванічним покриттям не впливає на їх властивості та чутливість. Якщо з технологічних причин на об'єкт дослідження покриття нанести не можна, то можна використовувати, як уже зазначалося, датчики з електролітичної фольги, яку отримують нанесенням гальванічного покриття на поверхню пластинки з нержавіючої сталі, сила зчеплення якої з покриттям невелика. Після отримання такого покриття його знімають із платівки і використовують для виготовлення датчиків. Датчики з мідної гальванічної фольги не вимагають температурної компенсації, вони не мають з'єднувальних проводів і зручні для застосування в тих випадках, коли необхідно визначати напруження в важкодоступних локальних місцях об'єкта, що циклічно навантажується. Чутливість гальванічних датчиків залежить від їх розмірів.

Спосіб оцінки напружено-деформованого стану елементів конструкцій за допомогою гальванічних покриттів практично реалізується наступним чином. На тарувальний зразок та досліджуваний об'єкт за однаковою техно-

логією наноситься мідне гальванічне покриття з однаковими властивостями. Тарувальні зразки піддаються циклічному навантаженню, в процесі якого їх фотографують.

Отримані зразки-фотографії містять інформацію про зміну стану темних плям та поверхні покриття залежно від діючих напружень для заданого числа циклів навантаження при таких же режимах випробування на втому, які характерні для об'єкта дослідження. Візуально порівнюючи в процесі випробувань об'єкта фотографії стану темних плям для його досліджуваних ділянок з еталонами, можна з певним наближенням визначити напруження, що діють на цих ділянках, для фіксованого числа циклів.

Зазначимо, що застосування методу гальванічних покриттів, незважаючи на його високу ефективність при оцінці напруженого стану в важкодоступних зонах деталей складної форми, що мають геометричні концентратори і піддаються циклічному навантаженню, в практиці експериментальних досліджень все ще обмежено.

4.1.7 Метод сіток

Метод сіток дозволяє вирішувати задачу оцінки пластичного деформування елементів конструкцій складної форми при великих деформаціях, що досягають граничних значень, за яких настає руйнування [19, 48]. Суть методу сіток полягає в тому, що на поверхню об'єкта дослідження наноситься система точок, міток або ліній, зміна взаємного розташування та конфігурації яких у процесі навантаження об'єкта відповідає деформації його поверхні. Вимірюючи спотворення елементів сітки, можна оцінити рівень пружних та пластичних деформацій об'єкта та визначати їх.

На початковому етапі розвитку метод сіток використовувався лише для якісного аналізу напружено-деформованого стану. Освоєння технології нанесення комбінованих прецизійних сіток та вдосконалення способів обробки дослідних даних на основі використання автоматизованих координатомірів та електронно-обчислювальних машин дозволили здійснювати кількісний аналіз із високою точністю для діапазону деформацій від 0,2 % до кількох десятків відсотків. Однак обробка експериментальних даних цим методом все ще залишається досить трудомістким процесом, що обумовлено великою кількістю вимірювальних операцій, що виконуються для великої кількості осередків на різних етапах деформування.

Найпростішим різновидом методу сіток є метод міток, що наносяться на деталь до випробувань, вимір відстані між якими дозволяє оцінювати характер деформування деталі на відповідних ділянках. Мітки можуть бути крап-

ками або рисками, застосування яких в основному пов'язане з визначенням лінійних деформацій. При дослідженні деформованого стану на поверхню наноситься система ліній, яка і є ділильною сіткою. Найбільшого поширення набули сітки таких типів: нормальні, що представляють собою два сімейства взаємно перпендикулярних ліній, напрямом яких орієнтується у напрямку головних напружень і деформацій (рис. 4.8а); дотичні, що формуються із системи взаємно-перпендикулярних ліній, напрямом яких збігається у вихідному стані з напрямком максимальних дотичних напружень і зсувів (рис. 4.8б); сітки із системи дотичних кіл однакового діаметра (рис. 4.8в) і комбіновані сітки, що містять в собі елементи перших трьох типів (рис. 4.8г). Крім цих основних сіток для вимірювань застосовуються сітки, утворені з концентричних кіл, сітки з постійним або змінним кроком, сітки радіальних ліній тощо [43].

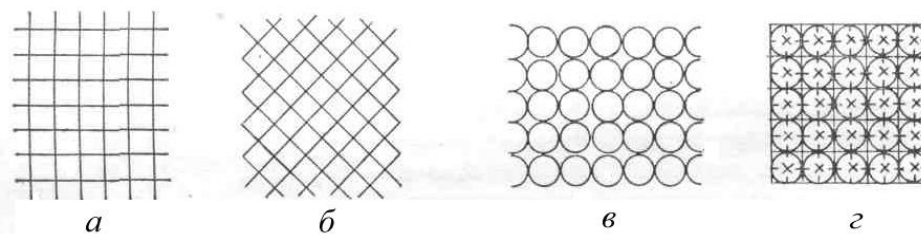


Рис. 4.8 Типи ділильних сіток: а - нормальна сітка; б - дотична сітка; в - сітка, що складається із системи кіл; г - комбінована сітка

Сітки першого типу з постійним кроком набули найбільшого поширення при дослідженні великих деформацій на поверхнях, що характеризуються близьким до однорідного напруженого стану і відсутністю значних градієнтів напружень деформацій. Вони відрізняються простотою отримання та зручні при обробці результатів експерименту, але не завжди ефективні при вивченні місцевих пластичних деформацій і не дозволяють враховувати вплив викривлення поверхні тіла на результати вимірювань.

Сітки другого типу в умовах плоскої деформації мають перевагу перед нормальними сітками, так як дозволяють реєструвати пластичний зсув по зміні кута комірки і менш чутливі до впливу кривизни поверхні на результати вимірювань.

Сітки третього типу зручні у випадках, коли напрям головних напружень заздалегідь невідомий; елементи кола таких сіток при деформуванні трансформуються в еліпси, напрям осей яких орієнтується у напрямку головних напружень. Ці сітки рекомендується застосовувати також для дослідження деталей та елементів конструкцій з концентраторами напружень, тому що з їх допомогою можна не тільки визначати напрям найбільших видовжень, але і

вимірювати пластичний зсув, досліджувати розподіл деформацій при великих градієнтах і вивчати кінетику розорієнтування головних та найбільших деформацій. За допомогою сполучених кіл можна також відновити вихідне положення сітки.

Комбіновані сітки є універсальними і дозволяють виконувати всі необхідні дослідження, які можна здійснювати за допомогою кожної з сіток перших трьох типів окремо, але вони є дрібнішими, наносяться на об'єкт дослідження за досить складною технологією і тому використовуються для точних вимірювань, коли застосовуються мікроскопи з великим збільшенням.

Для практичної реалізації можливостей методу розполільних сіток при постановці експерименту та реєстрації первинних дослідних даних необхідно задовольнити низку специфічних вимог. Практика показує, що з правильної організації технології нанесення сіток і техніки проведення досліджень можна отримати надійні експериментальні дані з необхідною точністю. Як приклад розглянемо випадок нанесення координатної сітки на площину дії головних деформацій. Компоненти головних деформацій найпростіше визначити, коли їх напрями відомі і змінюються у процесі навантаження. За таких умов коло, вписане у квадратну комірку сітки, перетворюється на еліпс, а комірка — у прямокутник (рис. 4.9).

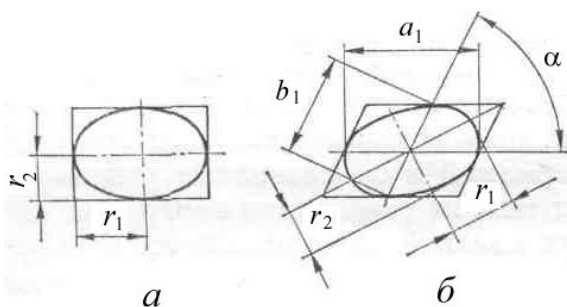


Рис. 4.9 Схеми перетворення квадрата на прямокутник (а) і квадрата на паралелограм (б)

Головні деформації еліпса розраховуються за формулами [19]

$$\bar{\varepsilon}_1 = \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad \bar{\varepsilon}_2 = \ln \frac{r_2}{r_0}, \quad (4.6)$$

де r_0, r_1, r_2 - відповідно радіус кола та головні півосі еліпса. Якщо деформація осередку супроводжується зсувом, то початковий квадрат перетворюється на паралелограм (рис. 4.9б). Вимірюючи розміри комірки після деформації (a_1 і b_1) і зміну кута між сторонами комірки (α), обчислюють напрям головних деформацій:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \alpha \left\{ \frac{1 - (r_2 / r_1)^2}{2} - \sqrt{\left[\frac{1 - (r_2 / r_1)^2}{2} \right]^2 - (r_2 / r_1)^2} \right\}, \quad (4.7)$$

де

$$r_{1,2} = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} \right)^2 - a_1^2 b_1^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (4.8)$$

Головні компоненти деформацій $\bar{\varepsilon}_1$ і $\bar{\varepsilon}_2$ визначають за формулами (4.6). Усі величини, що входять у співвідношення (4.6) - (4.8) визначаються за результатами обмірів сіток у вихідному та деформованому стані за допомогою мікроскопа та фотофіксацій. Точність вимірювань залежить від розмірів чарунок, товщини ліній і, зазвичай, визначається технологією та способом нанесення сітки на досліджуваний об'єкт.

Відомі такі способи нанесення сіток: кернення ліній алмазним або іншим ріжучим інструментом, фотолітографічний, травлених сіток, напилених сіток, накатаних сіток (тангірів і кліше).

Основними недоліками методів кернення і креслення є їх шкідливий вплив на матеріал поверхні і низька точність. В даний час ці методи використовуються тільки для грубих якісних оцінок напружено-деформованого стану, так як нанесені таким чином риси є концентраторами напружень, які спотворюють поле деформацій всередині чарунок і для високоміцних малопластичних матеріалів можуть викликати передчасне руйнування.

Фотолітографічний метод позбавлений зазначених недоліків. Він ґрунтується на застосуванні для вимірювань стандартних сіток, відтворюваність розмірів яких забезпечується для будь-якої великої кількості деталей. Нанесені на спеціально підготовлену поверхню тонкі лінії комбінованої сітки дозволяють вимірювати деформацію до 0,2 %. За очевидних метрологічних переваг цей метод відрізняється складною технологією та необхідністю застосування спеціального обладнання для нанесення шару емульсії, його обробки, експонування та травлення.

Фотолітографічним методом виготовляють ділильні сітки з кроком від 0,025 до 1 мм і шириною штриха 15-20 мкм. За дотримання всіх вимог технологічного процесу похибка виконання штрихів сітки за кроком становить не більше 0,25 мкм. Цим методом можна також отримувати жаростійкі сітки, якщо замість фарбування на позитиві вільних від емульсії ділянок сітки здійснювати їх хромування.

Для отримання зносостійких сіток, придатних для використання за високих температур, знаходить застосування **метод травлення**. Технологія нанесення сіток цим методом значно простіша, ніж при використанні фотолітог-

рафічного методу, проте в цьому випадку забезпечується і значно нижча точність вимірювання деформацій, так як використовуються сітки з розмірами чарунок 10-13 мм.

Метод напилення сіток використовується для нанесення сіток з базою 0,4-0,04 мм. При цьому товщина напиленого шару становить всього 0,1-0,005 мм. Перевагою таких сіток є те, що поверхня металу, що досліджується, не піддається пошкодженню. Для нанесення сітки на поліровану та знежирену поверхню встановлюється трафаретна сітка з міді, нікелю або іншого металу, а потім деталь розміщують у вакуумну піч, призначену для напилення металів, які мають невисоку температуру плавлення, таких як золото або сурма.

Метод накочування сіток за допомогою тангірів заснований на використанні широко застосованих у поліграфічній промисловості тангірів, що представляють собою рамку з натягнутою на неї тонкої желатинової плівки, на яку нанесена рельєфна сітка. Мінімальний крок такої сітки становить до 150 мкм, а товщина ліній знаходиться в межах 20-60 мкм. Використовуючи друкарські фарби, що повільно сохнуть, можна отримати роздільні сітки, які зберігають пластичність протягом декількох місяців. Накатані сітки деформуються разом із зразком, зберігаючи безперервність і чіткість ліній за будь-якого ступеня деформації. Метод тангірів можна застосовувати лише на полірованих плоских поверхнях. Недолік методу полягає у трудомісткості процесу накочування та великої його чутливості до фіксування положення тангіра та деталі.

Метод накочування ділільних сіток за допомогою металевих матриць, які представляють кліше сітки із заданим малюнком, дозволяє отримувати сітки з кроком 0,25-5 мм і товщиною ліній 20 - 80 мкм. Перевага цього методу полягає в тому, що сітку можна наносити як на плоску, так і на криволінійну поверхню, для чого застосовуються вузькі ролики різного діаметра чи валики певної конфігурації.

Якість нанесення сітки зазвичай контролюється мікроскопом. Сітка вважається хорошою, якщо при 50-кратному збільшенні її лінії зберігають чіткість, рівнотовщинність та безперервність, а кути перетину ліній не розмиті.

Діапазон вимірюваних методом ділільних сіток деформацій за однакових умов нанесення сітки обраного типу та реєстрації вимірювань залежить від розміру осередку сітки та ступеня нерівномірності розподілу деформацій. Максимальна доступна для вимірювання неоднорідна деформація визначається наближеним виразом [48] $\varepsilon_{\min} = 1,65(1 - 2a_0m)$, де a_0 - розмір чарунки недеформованої сітки; m - показник ступеня неоднорідності поля деформації.

цій. Мінімальна доступна для виміру неоднорідна деформація визначається з

$$\text{такого співвідношення: } \varepsilon_{\min} = 1,65 \frac{200 \sum \Delta_i^2}{\Delta U \% + 200 \sum \Delta_i^2},$$

де ΔU - точність вимірювання переміщень; Δ_i - похибка визначення складових розмірного ланцюга.

Точність вимірювання деформацій методом ділительних сіток залежить від точності нанесення базових ліній сітки, які, як було показано, можуть наноситися різними способами, а також від точності оптичних приладів, які застосовуються для визначення відстані між базовими лініями сітки та кутів їх повороту.

Зі збільшенням розмірів чарунки за інших рівних умов збільшується точність вимірювання деформацій, але зменшується роздільна здатність методу в зонах з високими градієнтами деформацій. Підвищення точності вимірювань при дослідженні об'єктів із суттєво неоднорідним напружено-деформованим станом вимагає використання ділительних сіток з якомога меншими розмірами чарунок та товщиною ліній. Вибір вимірювального інструменту повинен узгоджуватися зі способом нанесення сітки, так як використання мікроскопів з високою здатністю для вимірювання грубо нанесених сіток не дає збільшення точності вимірювання.

До основних недоліків методу слід віднести його невисоку точність при вимірі малих деформацій, можливість появи похибки у визначенні деформацій внаслідок порушення регулярної структури сітки, а також складність математичної обробки результатів обміру спотворених у процесі деформування чарунок сітки, що призводить до усереднення на базі чарунки.

Одним із варіантів методу сіток є **дзеркально-оптичний безконтактний метод** дослідження напружено-деформованого стану плоских деталей та елементів конструкцій за згину [19]. Відповідно до цього методу об'єкт дослідження з полірованою до дзеркального блиску поверхнею встановлюється в навантажувальний пристрій. На деякій відстані від поверхні об'єкта паралельно його площині розміщують екран, на якому нанесена сітка. У вихідному стані полірована поверхня відбиває лінії екрана без спотворення. Після навантаження об'єкт деформується, а його полірована поверхня викривляється. При цьому лінії екрана відбиваються від деформованої поверхні зі спотвореннями. Відображення сітки у вихідному та в спотвореному стані фотографується на ту саму плівку або фіксується на екран і фіксується суміщена картина відбитих ліній до та після деформації деталі. За спотвореним відображенням сітки оцінюється деформований стан досліджуваного об'єкта. Застосування безконтактного дзеркально-оптичного методу дуже ефективно для

дослідження кінетики деформування за високих температур, коли застосування інших методів затруднене. Цей метод відрізняється високою чутливістю та точністю вимірювань, порівняльною простотою проведення експерименту та обробки результатів. (2000 ОВД).

4.1.8 Метод ліній ковзання

Цей метод не забезпечує отримання первинної інформації, достатньої для кількісного аналізу напружено деформованого стану об'єктів дослідження і тому використовується спільно з іншими експериментальними методами. Суть методу ліній ковзання полягає в тому, що за пластичного деформування на поверхні металів виникають так звані лінії Чернова-Людерса, що спотворюють початковий рельєф поверхні. Так як розвиток пластичних деформацій в металах обумовлено дією дотичних напружень, то лінії ковзання, що утворюються, представляють собою сімейство ліній, що збігаються з траєкторіями максимальних дотичних напружень. Спостереження за утворенням та розповсюдженням цих ліній дозволяє вивчати закономірності пластичного деформування металів та визначити місце та межі зародження деформації за неоднорідного напруженого стану. Аналіз ліній ковзання при плоскому деформованому стані дозволяє визначити напрямок максимальних дотичних і головних напружень, а при використанні в якості допоміжних методів муару або оптично чутливих покриттів дозволяє також отримувати кількісні значення напружень і деформацій.

Відомо, що в будь-якій точці тіла, схильного до дії зовнішніх сил, існують головні площадки, де дотичні напруження дорівнюють нулю, і розташовані до них під кутом 45° взаємно перпендикулярні площадки, на яких діють максимальні дотичні напруження. Отже, траєкторії головних напружень завжди розташовані під кутом 45° до траєкторій максимального дотичного напруження. Тому, використовуючи сітку взаємно перпендикулярних ліній ковзання, можна з високою точністю визначити в будь-якій зоні досліджуваного елемента конструкції характер поля напружень і деформації, і за допомогою рівнянь опору матеріалів та теорії пластичної течії за відомими граничними умовами розраховувати напруження та деформації [19, 35].

Техніка реалізації методу ліній ковзання пов'язана з необхідністю використання деформованих поверхонь низької шорсткості, яка досягається за рахунок застосування таких фінішних операцій механічної обробки, як шліфування і полірування. Лінії ковзання, що з'являються на полірованій поверхні в результаті зміни її рельєфу за пластичного деформування, можуть спостерігатися і фотографуватися тільки за відповідного освітлення. Якщо ця

поверхня у вихідному стані була оптично плоскою, для реєстрації ліній ковзання рекомендується використовувати інтерферометр відбитого світла. Для визначення ліній ковзання можна також використовувати оптично чутливі покриття, у цьому випадку за полем ізоклін будують траєкторії максимального дотичного напруження, за якими прогнозують початкову картину пластичної течії. При розвиненому пластичному деформуванні ізохром витягуються вздовж ліній ковзання.

Лінії ковзання можуть бути виявлені за допомогою травлення. При пластичному деформуванні відбувається зміна фізико-хімічних властивостей матеріалу і підбором відповідного розчину можна досягти хорошого розмаїття темних ліній сітки на світлому тлі. Так, для армко-заліза рекомендується травник, що є розчином хлорного заліза - 100 г і концентрованої сірчаної кислоти - 4 г в 1000 мл води, тривалість травлення в якому становить 16-18 год.

Лінії ковзання на поверхні деталі можна отримати також з використанням крихких плівок або за допомогою муарових смуг. Вибір способу отримання полів ліній ковзання залежить від цілей та умов проведення експерименту. Спосіб похилого освітлення відрізняється простотою і доступністю, проте спостерігається, що при використанні цього способу лінії не завжди досить контрастні. Спосіб травлення застосовується тільки для деяких металів і сплавів. За допомогою крихких покриттів отримують досить контрастну сітку ліній, але вони не довговічні. Область застосування оптично чутливих покриттів для дослідження ліній ковзання обмежується *лише областю кімнатних температур*.

Метод ліній ковзання в основному використовується для *якісної оцінки напружено-деформованого стану* деталей і елементів конструкцій, його технічна реалізація пов'язана з рядом методичних труднощів, і тому він не отримав достатнього поширення в практиці експерименту.

4.1.9 Метод муарових смуг

Метод муара є одним з найбільш досконалих методів дослідження напружено-деформованого стану поверхні твердих тіл. Він ґрунтується на ефекті виникнення картини «муарових смуг» при деформації однієї з двох растрових ґраток.

Зміни кроку, напрями та положення муарових смуг значно більші порівняно з деформаціями, що викликають ці зміни. Тому метод муара дуже чутливий до деформування поверхні об'єкта дослідження, а також до її кутових та лінійних переміщень. У порівнянні з раніше розглянутими методами він дозволяє підвищити точність вимірювань і спростити процедуру отримання

наочних картин, що ілюструють безпосередньо на досліджуваному об'єкті характер розподілу деформацій. Цей метод дозволяє досліджувати поля деформацій на великих площах поверхні об'єктів практично з будь-яким ступенем локалізації. Він характеризується досить високою працездатністю в широкому інтервалі температур за статичного та динамічного навантаження плоских і просторових тіл, при дослідженні коливань і може самостійно використовуватись для вивчення різних фізичних явищ [19, 43].

Принцип методу муара заснований на відомому фізичному явищі – відображення двох гармонійних коливань при накладенні двох растрових решіток з частотою ліній 3 і більше на 1 мм (для отримання муарових смуг, як правило, використовуються ґратки з прозорістю 50% і частотою ліній не вище 80 ліній на 1 мм). Нагадаємо, що відображенням називається явище, при якому змінюється амплітуда результуючого коливання, яке виникає при складанні двох періодичних процесів з періодами, що незначно відрізняються. При відображенні спостерігається періодичне посилення чи ослаблення будь-яких досліджуваних величин. Муаровий ефект, є збіганням густоти накладених один на одного масивів ліній, пов'язаний з виникненням квазіінтерференційних світлих і темних смуг, частота повторення яких, характер і щільність дозволяють визначити величину і напрямок переміщення растрових решіток відносно одна одної. При аналізі цього ефекту та розробки методів, що дозволяють розрахувати величину та напрямок переміщень, використовується три підходи [43].

Перший заснований на аналізі геометричних залежностей між кроками і відносним положенням двох ґраток, з одного боку, і між кроком і кутом нахилу муарових смуг - з іншого. **Другий** підхід пов'язаний з поданням періодичних затемнень решіток у вигляді двох функцій, найчастіше виражених у параметричній формі, і з аналізом результатів складання або віднімання цих функцій. **Третій** підхід ґрунтується на інтерпретації ліній муарового ефекту як ліній однакового переміщення та на розробці способів розрахунку дійсних значень величини переміщень.

Геометричний підхід є найпростішим і наочним для розуміння фізичної сутності явища. Він дозволяє дослідити процес утворення муарових смуг як результат перетину двох систем ліній - еталонної ґратки та робочої ґратки. В процесі деформування деталі і викривлення робочої ґратки картина Муарових смуг фіксується камерою. Знаючи відстань між лініями еталонної решітки та вимірявши відстань між смугами, можна на базі геометричного аналізу перетину двох систем ліній обчислити відстань між лініями решітки деталі на деякій ділянці та зміну їхнього напрямку. Ці дані дозволяють визначити лінійні та зсувні деформації.

Растрові ґратки є масивами ліній, кіл, точок або інших фігур, які нанесені на прозорі пластинки або деталь. Для створення муарової картини необхідні дві решітки, які можуть бути абсолютно однаковими або істотно відрізнятися. Еталонна решітка наноситься на прозору пластинку, а робоча – на досліджувану деталь. Крок ліній найчастіше вибирається постійним, а ширина прозорих (світлих) і непрозорих (темних) ліній приймається однаковою. Деякі типи решіток, що використовуються у методі муара, показані на рис. 4.10а,б,в, а на рис. 4.10г проілюстрована картина муарових смуг, що утворюються при довільному накладенні двох орнаментних решіток.

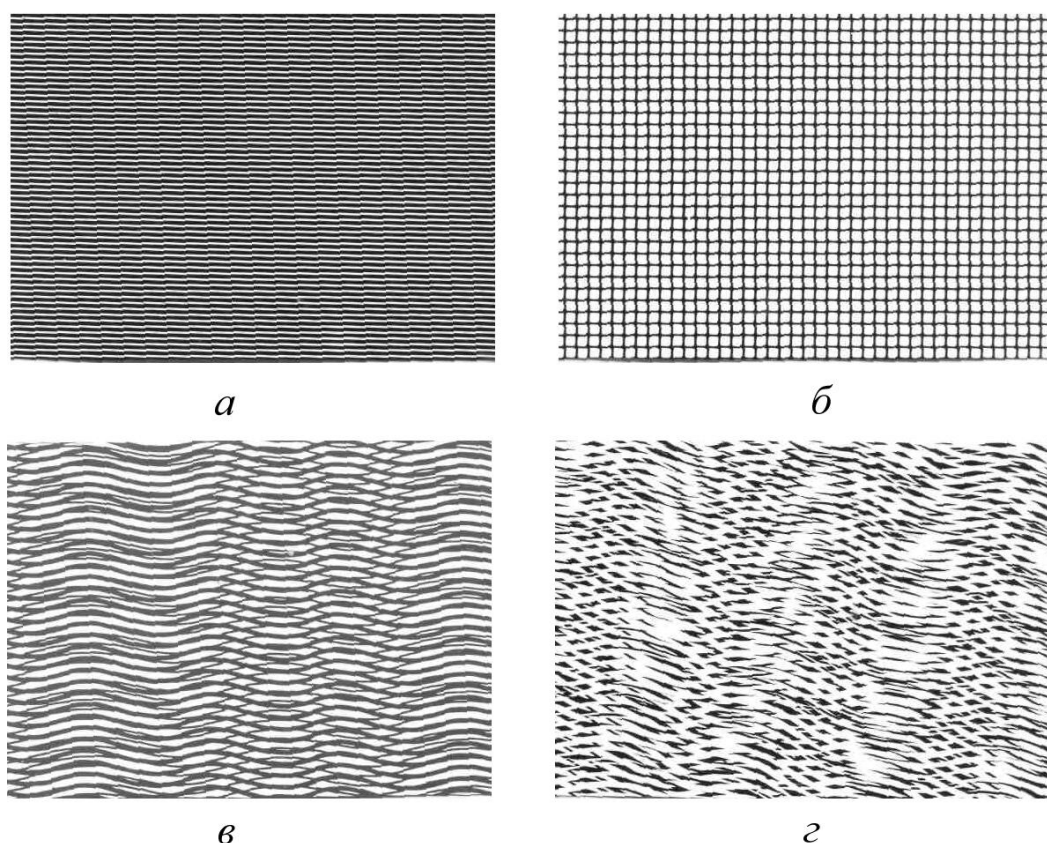


Рис. 4.10 Типи ґраток, що використовуються в методі муару: *а* - ґратки прямих ліній; *б* - ґратки ліній, що перетинаються; *в* - орнаментна ґратка; *г* - муар, що утворився після накладання двох орнаментних ґраток

Для характеристики ґратки і муарових картин використовуються такі параметри: p - крок ґратки; $1/p$ - її щільність; δ - відстань між муаровими смугами. Головним називають перпендикулярний до ліній ґратки напрямок, а вторинним - паралельний. Найпростіший випадок накладання під деяким кутом двох однакових ґраток, що складаються із системи прямих паралельних світлих і темних смужок, представлений на рис. 4.11 [19].

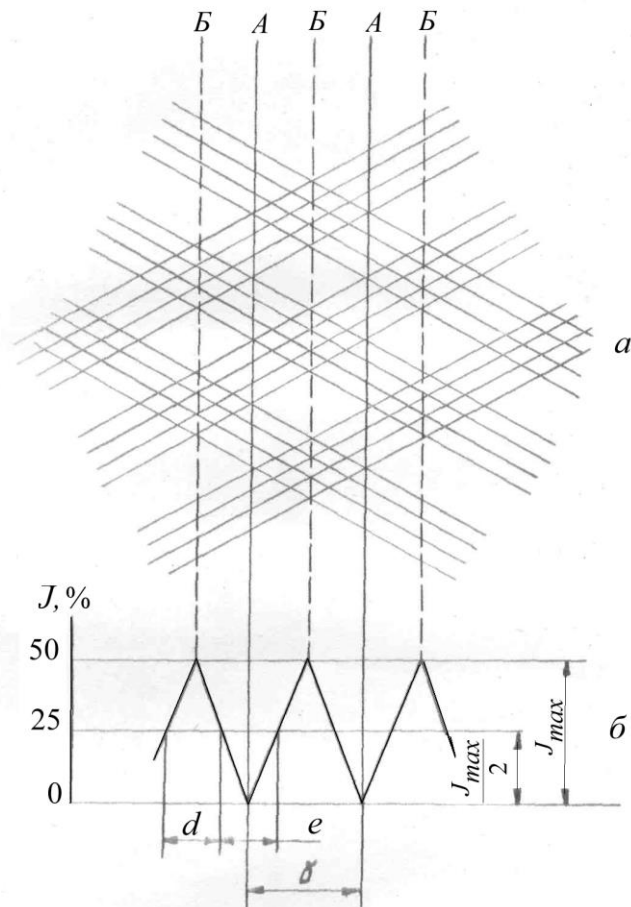


Рис. 4.11 Схема утворення муарових смуг (а) та графік розподілу середньої інтенсивності світла (б)

При накладенні таких решіток 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 вздовж лінії А видно безперервну темну смугу, а вздовж лінії В - світлу смугу. Цей ефект пояснюється тим, що людське око має обмежену роздільну здатність і не може виділити деталей об'єкта, кут зору яких менше 1 хв, а сприймає тільки середню інтенсивність світла. Тому при розгляді муарової картини незброєним оком лінії первинних ґраток не видно, а муарові смуги здаються безперервними.

На рис. 4.11б показаний характер зміни середньої інтенсивності світла, що проходить через накладені решітки. З малюнка випливає, що інтенсивність світла при переході від ліній А до ліній В змінюється лінійно, а ширина чорної муарової смуги, що збігається з лінією А, дорівнює нулю. Однак видима ширина цієї смуги відрізняється від нуля, що пов'язано з недостатньою роздільною здатністю ока. Тому в якості ефективної ширини темної муарової смуги приймають таку, всередині якої значення інтенсивності не перевищують половини її максимального значення. В даному випадку ширина темної

та світлої муарових смуг однакова і дорівнює $e = d = \delta/2$. Розподіл середньої інтенсивності показує, що темна смуга муара пропускає 12,5 % падаючого світла, а світла - 37,5 %. Таким чином, смуги не є чисто білими чи чорними, а характеризуються різним ступенем зачорнення.

Велике значення для реалізації можливостей методу муарових смуг мають питання технічної підготовки експерименту та реєстрації первинної інформації. Технологія виготовлення еталонних і робочих ґраток повинна, як правило, забезпечувати їхню ідентичність, незважаючи на різні умови нанесення. Еталонні решітки наносяться на прозорі жорсткі або гнучкі пластинки, а робочі - на поверхню деталі, яка може бути виготовлена з різного матеріалу і мати складну геометричну форму. Очевидно, що способи отримання еталонних і робочих ґраток повинні істотно відрізнятися. При цьому технологія нанесення решіток на деталь практично аналогічна технології виготовлення ділильних сіток.

В якості еталонної ґратки найчастіше використовуються стандартні друкарські растри, які задовольняють вимогам, що пред'являються до ґраток. Еталонні решітки з невеликою частотою ліній можна отримати фотоспособом. Високочастотні растри отримують за допомогою нерухомого інтерференційного поля, утвореного кількома пучками монохроматичного когерентного випромінювання.

Для нанесення решіток на деталь переважно застосовуються три способи: механічний, фотолітографічний та гальванохімічний [19]. При використанні фотоспособу на деталь наноситься світлочутливий шар, на який копіюється еталонна решітка.

Механічні способи нанесення решіток за допомогою ріжучого інструменту в основному застосовуються в тих випадках, коли необхідно досліджувати досить великі деформації (більше 3%) за високих температур і статичного навантаження. Ці обмеження пов'язані з тим, що нанесені за допомогою інструменту ґратки пошкоджують матеріал і є джерелом концентрації напружень, яка може істотно знизити несіву здатність досліджуваного об'єкта за дії циклічних навантажень в умовах кімнатних та за низьких температур.

Гальванохімічний спосіб дозволяє отримувати ґратки, які можуть витримувати тривалий час високі температури (до 1300 К) і придатні для вимірювання малих деформацій. Технологія отримання таких ґраток складніша, ніж звичайних, вимагає дотримання заходів техніки безпеки і не завжди дає стабільні результати. Гальванохімічний спосіб у свою чергу можна розділити ще на чотири способи: травлення, трансплантаційний, окисдованих шарів та тиснення. Найкращі результати дає спосіб *травлення*, який дозволяє вигото-

вляти ґрати великої густини (до 50 ліній на 1 мм) і може бути використаний при дослідженні малих пластичних деформацій.

Муарові картини у процесі випробувань фотографуються для подальшої обробки. Важливе значення при їх фотографуванні має розташування еталонних ґраток, від якого залежить достовірність отриманих результатів. Використовують кілька способів поєднання еталонних та деформованих ґраток. Еталонну решітку можна попередньо нанести на матове скло фотокамери або надрукувати на негативі для подальшого суміщення з робочою. Можна також розташовувати еталонні ґратки перед матовим склом фотокамери і візуально спостерігати картину муарових смуг при налаштуванні фотокамери. Найчастіше деформовану та еталонну ґратки фотографують на різні негативи, які при друкуванні поєднуються. Змінюючи масштаб зображення, можна завжди досягти рівності кроків обох ґраток.

Похибка визначення переміщення в методі муара за інших рівних умов залежить від точності нанесення вихідної решітки та визначення координат центру смуги. Ці складові можуть давати за кімнатних умов похибку 0,2-0,5% та 0,1-0,5% відповідно при відпрацьованій методиці нанесення ґратки та техніці фотографування муарових картин. З підвищенням температури досліджень до 1100 К і вище сумарна похибка вимірювання переміщень зростає до 5%.

Зі збільшенням порядку смуги та зменшенням кроку решітки похибка вимірювань зменшується.

Решітки, що використовуються в традиційному варіанті методу муара є регулярними у вихідному стані об'єкта. Якщо решітку необхідно нанести на криволінійну поверхню, технологія нанесення істотно ускладнюється. У цьому випадку можуть бути використані нерегулярні растри.

Один з варіантів методу муарових смуг - так званий метод відображеної сітки дозволяє дуже ефективно досліджувати не тільки переміщення, що виникають в досліджуваній площині, але також переміщення та деформації, які спрямовані перпендикулярно до досліджуваної поверхні. Це завдання особливо актуальне для пластин і оболонок. Суть методу відображеної сітки полягає у наступному. Перед матовою поверхнею об'єкта дослідження встановлюється на деякій відстані від неї еталонна решітка, яка висвітлюється плоским пучком світла, нахиленим під невеликим кутом до нормалі поверхні. Світло, пройшовши через еталонні ґратки, утворює на матовій поверхні об'єкта тінь. Така тінь, що представляє при незмінній відстані від решітки до поверхні майже не спотворену копію еталонної решітки, може інтерферувати з ґратками, утворюючи муарові смуги, що добре спостерігаються у напрямку, перпендикулярному до еталонної решітки. В даному випадку муарові смуги є

геометричним місцем точок з постійною відстанню між еталонними ґратками та об'єктом дослідження. Якщо еталонна решітка до деформації знаходилася в контакті з поверхнею, то точки контакту, що збереглися після прикладання навантаження, матимуть нульові переміщення з порядками смуг, рівними нулю. Стосовно дослідження пластин метод відображеної сітки використовується для визначення кутів нахилу поверхні як спільний варіант методу муарових смуг і дзеркально-оптичного методу ділильних сіток. Відповідно до цього методу на досліджувану дзеркальну поверхню проектується нанесена на спеціальний екран еталонна решітка. Відображене від поверхні об'єкта до і після навантаження зображення ґратки фотографується на ту саму пластинку. Виникає картина муарових смуг, розшифровка якої дозволяє визначити зміну кутів нахилу поверхні на великій площі. З використанням методу муарових смуг можна визначити переміщення та деформації від *0,1% до кількох десятків відсотків*.

4.1.10 Метод голографічної інтерферометрії

Голографія є заснованим на використанні явища інтерференції хвиль методом отримання об'ємного зображення, що дозволяє дуже ефективно досліджувати напружено-деформований стан елементів конструкцій складної геометричної форми. Перевага цього методу в порівнянні з іншими методами дослідження полів деформацій і напружень полягає в тому, що застосування методу голографічної інтерферометрії не пов'язане з необхідністю проведення спеціальної механічної обробки об'єкта дослідження та задоволенням жорстких вимог до оптичних характеристик поверхонь відображення. Отже, процедура підготовки та проведення експерименту не вимагає зміни стану поверхні деталі, нанесення сіток, покриттів і виконання технологічних операцій, які чинять більш-менш істотну пошкоджувальну дію на матеріал, і всі вимірювання виконуються на досліджуваному об'єкті у вихідному робочому стані незалежно від ступеня його конструктивної складності.

Простота реалізації методу за наявності необхідної апаратури пояснюється тим, що в процесі експерименту на одній фотопластинці послідовно реєструються дві інтерференційні картини, отримані для двох послідовних станів об'єкта, що мало відрізняються, в процесі його деформування. Такий фотографічний запис інтерференційних картин називають голограмами. При просвічуванні голограм, отриманих таким чином для кількох станів деталі, що навантажується, утворюються зображення деталі для відповідного числа станів. Завдяки інтерференції на поверхні зображення спостерігаються смуги, за якими можна аналізувати деформацію деталі.

Для запису та відновлення об'ємного зображення досліджуваного об'єкта в процесі його деформування використовується інтерференція двох когерентних пучків світла - предметного та опорного, перший з яких висвітлює об'єкт і розсіюється ним, а другий створює когерентний фон. Так як предметна і опорна світлові хвилі мають когерентність, то різниця фаз між ними залишається постійною і створюється інтерференційна картина, яка записується на фотопластинку - голограму. Для відновлення зображення об'єкта, голограма висвітлюється опорним пучком.

Голографічний метод запису та відновлення хвильового фронту може бути реалізований у широкому діапазоні електромагнітних, акустичних, рентгенівських та інших типів хвиль. Найбільше застосування голографія знаходить в оптичному діапазоні електромагнітного спектру, для якого її можливості особливо значно розширилися з появою лазерів.

Відомі різні схеми запису голограм за допомогою лазерних джерел світла. На рис. 4.12 показана схема отримання голограм з опорним пучком, розташованим під кутом до пучка, що розповсюджується від об'єкта [19].

Ця схема застосовується для отримання об'ємних зображень об'єктів, що дифузно відбивають світло (рис. 4.12а) і при голографуванні прозорих об'єктів (рис. 4.12б). У першому випадку промінь світла від лазера 1 надходить на світлоділник 2, де він поділяється на опорний і предметний пучки, які після проходження через систему відбивних дзеркал 3 перетворюються за допомогою лінз 4 в широкі пучки світла зі сферичними або плоскими фронтами. Предметний пучок при цьому висвітлює об'єкт 5 голографування, а опорний пучок направляється таким чином, щоб він перетинався під деяким кутом зі світловими променями, відбитими від об'єкта. Так як обидва пучки когерентні, між ними відбувається інтерференція у тому обсязі, в якому вони перетинаються. Інтерференційна картина реєструється на фотопластинці 6, яка розташована в області перетину предметного та опорного пучків.

При отриманні об'ємного зображення прозорих об'єктів використовується схема (рис. 4.12б), відмінність якої полягає тільки в тому, що предметний пучок світла після світлорозділювача і системи лінз направляється через дифузор 7 безпосередньо на прозорий об'єкт 5. Після проходження через об'єкт предметний пучок перетинається з опорним і утворюється інтерференційна картина, яка також реєструється на фотопластинку.

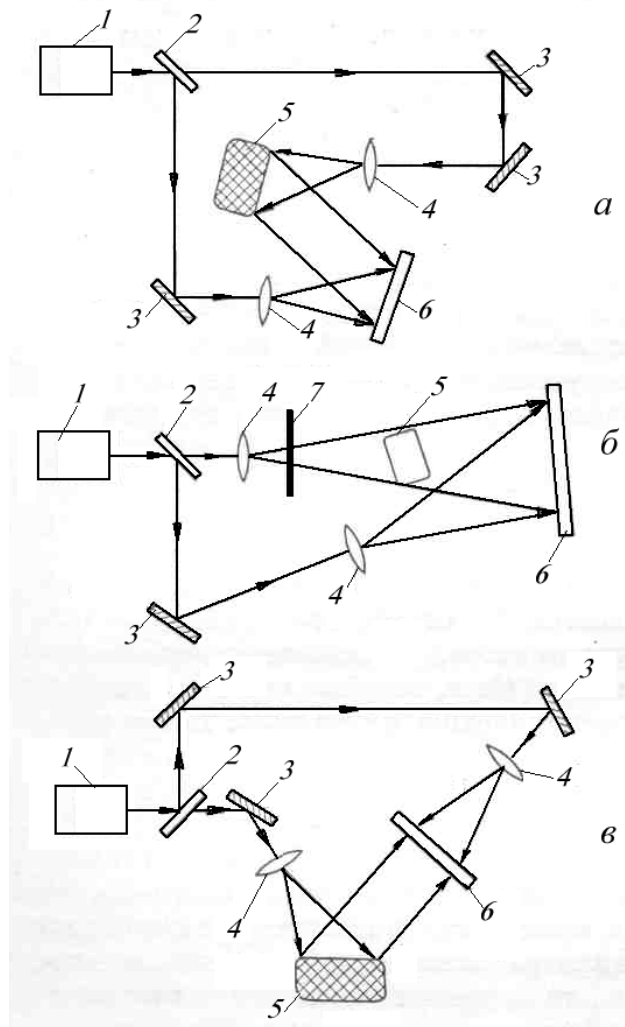


Рис. 4.12 Схема отримання голограм з похилим опорним пучком при реєстрації відбивних (а), прозорих (б) об'єктів і в зустрічних пучках відбивних об'єктів (в)

У разі голографування об'єктів у зустрічних пучках (рис. 4.12в) предметний та опорний пучки спрямовані на фотопластинку з протилежних сторін під кутом, близьким до 180° . Для реєстрації голограм за цією схемою застосовується емульсія значної товщини, яка повинна бути більшою за відстань між сусідніми поверхнями інтерференційних максимумів. Такі голограми називають об'ємними чи тривимірними; вони дозволяють отримувати кольорові об'ємні зображення предметів, що відновлюються в білому кольорі.

При відтворенні зображення голограма висвітлюється відповідним вихідному опорному пучку хвильовим фронтом, який при попаданні на фотопластинку забезпечує відновлення предметного хвильового фронту також у вихідному стані. Відновлені хвилі дозволяють окремо спостерігати дійсне та уявне зображення об'єкта.

Голограми відрізняються від об'ємних фотографій тим, що в них реєструється інформація про *амплітуду і фазу предметної хвилі*, а у фотографії - тільки інформація про розподіл освітленості. Тому при освітленні опорною

хвилею голограма відновлює об'ємне зображення предмета. Важливе значення для отримання якісних голограм має наявність достатньої жорсткості та нерухомості механічних та оптичних елементів голографічної установки. При експонуванні має забезпечуватися нерухомість інтерференційної картини відносно фотопластинки; тому при зйомках об'єкт дослідження, оптичні елементи, джерело світла і фотопластинка повинні фіксуватися на єдиній масивній основі - плиті, яка розміщується на амортизаційній системі для захисту оптичних пристроїв від впливу зовнішніх вібрацій, здатних спотворити інтерференційну картину, що реєструється. Використання імпульсних лазерів суттєво знижує вплив температурної нестабільності та механічних впливів на процес голографування. Крім того, лазерні пучки мають високу когерентність і велику інтенсивність, достатню для того, щоб світлочутливий матеріал, що використовується для отримання голограм, зареєстрував інтерференційну картину. У зв'язку з цим лазери є невід'ємними елементами голографічних установок, що використовуються для вивчення закономірностей деформування і руйнування твердих тіл.

Для отримання голографічних інтерферограм використовують такі основні методи [19]:

- реального часу,
- двох експозицій,
- усереднення в часі,
- стробоскопічний.

Перші два методи застосовуються в макроексперименті для дослідження нерухомих об'єктів за статичного, динамічного та циклічного навантаження. Методи усереднення в часі і стробоскопічний, які принципово не відрізняються від них, знаходять використання для дослідження об'єктів, що вібрують.

Метод реального часу дозволяє зіставляти інтерференційну картину, що виходить при накладенні двох когерентних хвиль – яка безпосередньо йде від об'єкта під час спостереження, і хвилі, відновленої голограмою і відповідної вихідному стану об'єкта. Цей метод дозволяє за зареєстрованою картиною інтерференційних смуг досліджувати кінетику зміни стану об'єкта в часі і фіксувати ці зміни у вигляді інтерферограм. При його реалізації зустрічаються труднощі, які пов'язані, по-перше, з необхідністю встановлення з високою точністю оброблених голограм у вихідне при зйомці положення (ця процедура спрощується в результаті обробки фотопластинок на місці), по-друге, зі спотворенням картини інтерференційних смуг при усадці емульсії в процесі мокрої обробки фотоматеріалу і, по-третє, з необхідністю зрівнювання інтенсивності відновленої та вихідної предметних хвиль без внесення додаткового

фазового зсуву як обов'язкової умови отримання контрастної інтерференційної картини. Однак цифрове фотографування нівелює ці недоліки.

Незважаючи на зазначені недоліки, цей метод при сучасній техніці експерименту дозволяє отримувати висококонтрастні інтерференційні смуги і дає хороші результати при дослідженні процесів, що протікають в умовах статичного навантаження.

Метод двох експозицій полягає у тому, що у фотопластинці до її обробки реєструється дві інтерференційні картини - перша для вихідного стану об'єкта і друга для деформованого. При освітленні отриманої голограми опорним пучком одночасно відновлюються дві предметні хвилі, які інтерферують між собою, утворюючи картину інтерференційних смуг, що характеризує зміну стану об'єкта між першою і другою експозиціями. Цей метод вільний від тих недоліків, які характерні для методу реального часу.

При забезпеченні однакових умов голографування об'єкта у двох станах інтенсивність обох відновлених предметних хвиль однакова і тому інтерференційні смуги мають високий контраст. Метод двох експозицій з високою ефективністю можна застосовувати при дослідженні процесів деформування та руйнування в умовах циклічного та динамічного навантаження. Так, з використанням імпульсних лазерів, що мають дуже низький період випромінювання, отримані картини інтерференції навіть від ударних хвиль.

При розшифровці голограм необхідно вміти на картині інтерференційних смуг визначати компоненти векторів переміщень точок поверхні. Практичне застосування методу голографічної інтерферометрії в основному залежить від ступеня розробленості способів розшифрування інтерферограм, і слід відзначити, що цим питанням приділяється велика увага.

Метод голографічної інтерферометрії дозволяє визначати нульове переміщення з дуже високою точністю. Так, при визначенні переміщень методом трьох голограм абсолютна похибка вимірювань становить частки мікрометра [19]. Незважаючи на те, що голографічні методи дослідження напружено-деформованого стану в МДТТ ще знаходяться в процесі свого становлення, вже очевидні їх переваги в порівнянні з іншими однотипними методами. У звичайній інтерферометрії об'єкт дослідження повинен мати просту форму та поліровану оптичну поверхню; голографічна інтерферометрія завдяки своїм специфічним особливостям дозволяє досліджувати предмети будь-якої форми з поверхнями, що дифузно відображають світло. На голографічній інтерференційній картині практично не позначаються шорсткості поверхні, оскільки обидві когерентні хвилі спотворюються ними з однаковим ступенем (не можна допускати при переході об'єкта з одного стану в інший зміни структу-

ри поверхні, що викликає зміну її відбної здатності, так як у цьому випадку відбудеться спотворення інтерференційної картини).

У голографічній інтерферометрії допускається використання оптики не дуже високої якості. Метод голографії може використовуватися для дослідження великогабаритних деталей та елементів конструкцій. Похибка вимірювань цим методом дуже маленька і вкладається у 10 ОВД.

4.1.11 Метод спекл-інтерферометрії

«Спекл» (speckle) англійською означає «пляма».

Явища, подібні до спеклів, пов'язані з появою на поверхні деформованих об'єктів дослідження зон різної освітленості – тінювих плям, спостерігалися і до появи лазерних джерел світлових хвиль, проте тільки завдяки винаходу лазерів метод дослідження деформації з використанням плям-спеклів отримав право на життя.

Лазерна спекл-інтерферометрія дозволила поширити інтерференційні методи на об'єкти, які дифузно відбивають світло і визначати їх деформацію з дуже високою точністю, порівнянною з точністю методів голографічної інтерферометрії, які досягають 10 ОВД [55].

До розробки методу спекл-інтерферометрії американським вченим Ліндертцом у 1970 р. при дослідженнях вже використовувався метод спекл-фотографії, при реалізації якого поверхня висвітлюється одним лазерним променем. Для декількох послідовних станів об'єкта, що деформується, спекли фотографуються і їх розміри зіставляються у відповідній черговості, дозволяючи визначати деформацію.

Методи спекл-інтерферометрії відрізняються тим, що плями висвітлюються двома лазерами з когерентними променями, які формують у зоні плям інтерференційні картини, порівнюючи які з вихідним станом так само, як і метод спекл-фотографії, можна визначати величину деформації, але з більш високою точністю .

4.1.12 Тінювий оптичний метод «Каустик»

"Каустика" перекладається з грецької як фокальна лінія. У цьому методі це межева лінія, що розділяє зону підвищеної освітленості і тінюву зону, які утворюються в площині зображення при просвічуванні в процесі навантаження пластини з оптично прозорого матеріалу.

Відомо, що якщо через прозорий матеріал пропускати світлові промені, то в зонах потоншення та потовщення промені будуть відхилятися і на екрані

давати картину з різним ступенем освітленості. У зоні дії стискаючих напружень відбувається збільшення лінійних розмірів і ущільнення матеріалу, а в зоні дії напружень розтягу, матеріал потоншується і зменшується його щільність, що викликає відхилення променів в порівнянні з їх напрямом в недеформованому матеріалі.

Принцип утворення тінювих оптичних зображень показано на рис. 4.13, де в центрі пластини прикладені лінійно змінні стискаючі напруження [55].

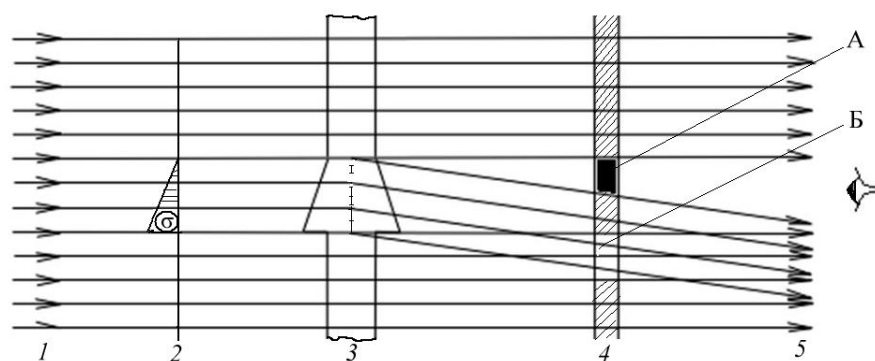


Рис. 4.13 Схема утворення тінювих зон на зображенні: 1 – пучок світла, що падає; 2 – елюра стискаючих напружень; 3 – зразок; 4 – площина зображень; 5 – спостереження

Для такої зміни напружень товщина пластини і показник заломлення матеріалу лінійно збільшуються на ділянці дії стискаючих напружень. При цьому обидва ефекти мають однаковий вплив на відхилення променів світла, що порушує рівномірний (початковий) розподіл освітленості. Як показано на рис. 4.13, пластина висвітлюється паралельним пучком світла. Через ненавантажені частини пластини світлові промені проходять, не відхиляючись; у середній частині промені відхиляються, що схематично показано у вигляді ділянки з постійним кутом нахилу поверхні. Тому розподіл інтенсивності світла у довільній площині зображення або реєстрації за зразком вже нерівномірний.

На деякі зони світло не потрапляє (зона А, рис. 4.13) і є темною, тоді як на інші зони падає більше світла, і яскравість цих зон підвищується (зона Б, рис. 4.13). Такий розподіл освітленості можна спостерігати на екрані, і по тінювій картині, що формується з урахуванням характеру межі між двома цими зонами контрастної освітленості можна давати кількісний опис напружень у навантаженій пластині.

Автор методу «каустик» - американський вчений Маног [55] розробив його у 1964 р. для дослідження розподілу напружень у вершині тріщини, тобто в областях із суттєвим градієнтом напружень. І в даний час він використовується в основному в тих випадках, коли необхідно оцінити рівень напружень в таких зонах конструкцій, які характеризуються суттєвою неоднорідністю.

рідністю напружено-деформованого стану, тобто у зонах тріщин та різних концентраторів напружень.

Необхідно підкреслити, що застосування методу каустик не вимагає використання складної апаратури і ґрунтується на відносно простих обчисленнях стосовно геометричних фігур нескладної форми.

4.1.13 Метод термографії

Метод термографії або SPATE-метод (stress pattern analysis by thermal emission) заснований на безконтактному дослідженні полів напружень з використанням теплового випромінювання в інфрачервоній області спектра [56].

Англійський вчений Томсон (лорд Кельвін) в 1878 р. встановив лінійну залежність між зміною температури та зміною головних напружень, а в 1955-1956 р.р. Біо розвинув теорію, що дозволяє пояснити та описати встановлений Томсоном взаємозв'язок.

На основі цих розробок у 1978-1985 р.р. створено та промислово випускається обладнання для сканування інфрачервоного випромінювання – система SPATE-8000, що дозволяє реєструвати зміну температури до 10^{-3} К.

Обчислювальна система цього обладнання в реальному часі дозволяє визначати за температурою значення напружень для всього поля спостереження і забезпечує його подання на моніторі комп'ютера в кольоровому зображенні відповідно до даних попереднього тарування.

Метод термографії характеризується дуже високою точністю вимірювань; його похибка для сталі становить 3,5 ОВД, а епоксидної смоли – 11 ОВД.

До обмежень методу можна віднести таке:

- вимірювання цим методом можна проводити тільки при циклічному навантаженні;
- він є ефективним лише для оцінки напруженого стану за умов пружного деформування;
- при вимірюванні температур з використанням скануючої головки необхідно безпосередньо спостерігати за поверхнею об'єкта дослідження або, у гіршому випадку, через дзеркало;
- температура досліджуваної поверхні повинна бути строго постійною для виключення температурної похибки вимірювання, яка у зв'язку з малістю вимірюваних температур може бути суттєвою;
- необхідно забезпечити виключення переміщення скануючої голівки по нормалі до поверхні, що досліджується.

Переваги методу термографії дозволяють віднести його до найефективніших методів дослідження напружено-деформованого стану об'єктів дослідження за пружного деформування і вони наступні:

- миттєве визначення напружень у реальному часі;
- безконтактність;
- широкий частотний діапазон в інтервалі 0,5-20 КГц;
- можливість сканування викривлених та нерівних поверхонь;
- висока роздільна здатність методу: точка вимірювання має діаметр 0,5 мм при відстані до скануючої головки 0,5 м для області сканування 10x10 м; із збільшенням відстані до об'єкта дослідження діаметр точки виміру збільшується;
- метод дозволяє досліджувати різні матеріали, у тому числі й крихкі;
- вихідна поверхня об'єкта дослідження не вимагає додаткової обробки, що виключає необхідність її пошкодження;
- метод дозволяє отримувати в реальному часі інформацію для поля сканування, що забезпечує об'єктивність в оцінці напружено-деформованого стану поверхні об'єкта дослідження з його суттєвою неоднорідністю.

Отже, з використанням установок системи SPATE, що випускаються промисловістю, можна отримати повне поле напружень для реальних конструкцій у будь-який момент часу з виявленням їх дефектів та оцінки їх довговічності в експлуатаційних умовах, що неможливо здійснити з використанням інших відомих експериментальних методів.

4.2 Засоби вимірювання, засновані на перетворенні деформації поверхні

4.2.1 Класифікація тензометрів

Тензометри використовуються для вимірювання лінійних деформацій, а тензорезисторні перетворювачі – для вимірювання переміщень, зусиль, тисків, крутних моментів та інших механічних величин, контрольованих у процесі випробувань. Принцип дії тензометрів і тензорезисторних перетворювачів заснований на перетворенні збільшення лінійного розміру, що відповідає базі засобу вимірювання, в будь-яку фізичну величину, зручну для підсилення та реєстрації.

Залежно від фізичних принципів, покладених в основу способів перетворення, тензометри поділяють на п'ять основних типів [46]:

- механічні,
- оптичні,

- струнні,
- пневматичні,
- електричні.

Досить широкого поширення на практиці експерименту отримали механічні, оптичні та електричні тензометри, причому останні у наш час широко застосовуються як для вимірювання деформацій, так і як датчики у системах автоматичного управління, різних галузей народного господарства. Тензометри дозволяють суттєво підвищити точність вимірювань порівняно з розглянутими вище методами дослідження полів деформацій, переміщень та напружень. Так, чутливість пневматичних тензометрів становить 0,00001% (0,1 ОВД), а ємнісних за відповідних умов досягає 0,000001% (0,01 ОВД). Нижче розглянуто конструктивні особливості тензометрів перерахованих типів, принцип їхньої роботи та метрологічні можливості; зв'язок між величинами вимірювання, які для них використовуються наведено вище в таблиці 4.1.

Механічні тензометри. У механічних тензометрах здійснюється масштабне перетворення вимірюваної деформації шляхом переміщення стрілки вздовж шкали. Для цього використовуються важільні або важільно-зубчасті передачі, що забезпечують збільшення у 100-2000 разів. Найбільш відомий тензометр Гугенбергера з базою 20 мм, абсолютна похибка вимірювання якого не перевищує 0,0015 % (рис. 4.14).

Корпус тензометра 3 має в нижній частині поперечину з нерухою призмою 1, яка спільно з рухою призмою 12 становить базу вимірювання.

Рухома призма є одним із кінців двоплевого важеля першого роду 10, який переміщується в площині креслення при деформуванні відносно точки контакту рухої призми і гнізда в поперечно корпусу. Переміщення важеля передається за допомогою траверси 8, зафіксованої на штифтах 5 і 9 пружиною 11, стрілці 4 тензометра, яка може обертатися відносно рухої опори 7. Стрілка тензометра переміщається перед дзеркальною шкалою 2. За допомогою гвинта 6 стрілка встановлюється в нульове положення. Високу точність вимірювань важільного тензометра забезпечують призми, що виключають можливість появи люфтів у ланцюжку масштабного перетворення деформації. Тензометри Гугенбергера є механічними пристроями з високою інерційністю деталей, тому вони можуть застосовуватися тільки за статичних випробувань, коли збільшення бази вимірювання відбувається з дуже низькою швидкістю. На об'єкті дослідження тензометри закріплюються за допомогою струбцин, вакуумних присосів або магнітів з зусиллям притискання, що виключає можливість пошкодження поверхні об'єкта та призми тензометра.

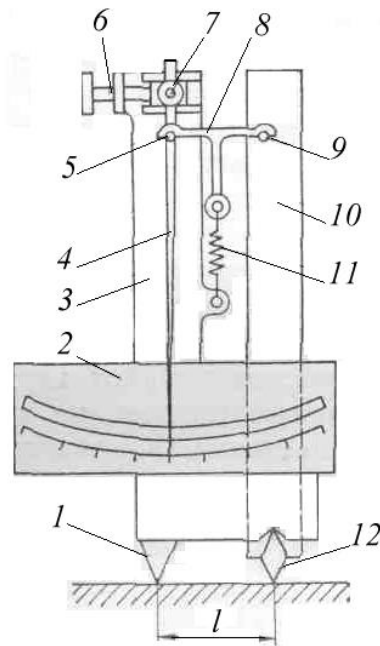


Рис. 4.14 Схема механічного тензометра Гугенберґера

Важельно-зубчасті передачі знайшли застосування в стрілочних індикаторах, які можуть використовуватися як основні елементи тензометрів. Тензометри зі стрілочними індикаторами забезпечують таку саму точність вимірювань, як і важільні тензометри Гугенберґера. Вони дозволяють вимірювати деформації не тільки при статичному, але і за змінного з низькою частотою повторно-змінного навантаження, характерного для малоциклової або термічної втоми.

Оптичні тензометри. Дія оптичних тензометрів так само, як і механічних, заснована на масштабному (без зміни фізичної природи вимірюваної величини) перетворенні деформації бази за допомогою світлового променя до величини, зручної для спостереження та реєстрації. У цих тензометрах роль важеля, пов'язаного з рухомою призмою, виконує світловий промінь, за переміщенням світлової плями якого на шкалі відраховується деформація. За таким принципом виготовлений тензометр Мартенса та інші оптичні тензометри, основна відмінність між якими полягає у реалізації різних оптичних схем та систем відліку показань. На рис. 4.14 показано схему оптичного тензометра з автоколімаційною дзеркальною системою відліку. Коефіцієнт перетворення таких тензометрів становить 1250, а абсолютна похибка вимірювань не перевищує 0,0005 %. Нерухома призма 6 виконана заодно з корпусом 1 приладу циліндричної форми, в якому розміщені шкала 2, окуляр 3 і об'єктив 4. Поворотне дзеркало 5 закріплено на рухомій призмі 7, яка повертається відносно точки контакту з корпусом при деформуванні зразка та зміні бази вимірювання. Прилад має шкалу, яка розмічена на 100 поділів; при цьому початок відліку розташовується посередині шкали.

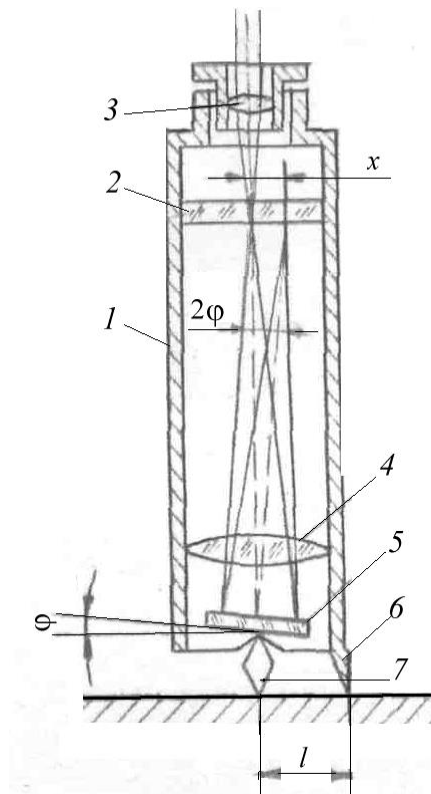


Рис. 4.14 Схема оптичного тензометра

При деформуванні об'єкта, що досліджується, дзеркало, жорстко пов'язане з рухомою призмою, повертається на кут φ , значення якого пропорційно видовженню Δl . Поворот дзеркала на кут φ викликає відхилення променя, що відображається дзеркалом, від вертикального напрямку, яке він займав до деформації, на кут 2φ . При цьому світлова пляма переміщається за шкалою на n поділок. Якщо кут φ малий, можна прийняти $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$ і записати

$\Delta l = r\varphi = r \frac{n}{2L}$, звідки отримаємо такий вираз для збільшення приладу k :

$k = \frac{n}{\Delta l} = \frac{2L}{r}$. Тут r і L – плечі важеля першого роду, утвореного рухомою

призмою та світловим променем (r – висота рухомої призми, L – відстань від точки контакту рухомої призми до шкали по осі труби, тобто у вихідному стані). Якщо використовується ноніусна шкала і відлік показань проводиться за допомогою вимірювального окуляра, похибка вимірювання оптичних тензометрів може бути зведена до 0,0002%.

Оптичні тензометри в основному використовуються в лабораторних умовах для вимірювання деформацій за статичного та повторно-статичного навантаження. Однак у зв'язку з тим, що в порівнянні з механічними ці тензометри мають значно меншу інерційність при вищій чутливості, вони мо-

жуть застосовуватися і для вимірювання швидкоплинних процесів, якщо буде забезпечено автоматичний запис переміщення світлової плями за шкалою.

Струнні тензометри. Принцип дії цих тензометрів ґрунтується на залежності частоти власних коливань струни від її натягу

$$f = \frac{1}{2l_c} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (4.9)$$

де l_c – вільна довжина струни; σ – напруження розтягу; ρ – густина матеріалу струни.

Чутливим елементом струнного тензометра є натягнута струна, яка пов'язана з об'єктом дослідження таким чином, що в процесі його деформування змінюється її натяг. Зміна натягу струни викликає зменшення або збільшення напружень, що діють у ній, і, як впливає з виразу (4.9), частоти її власних коливань. Вимірюючи частоту коливань струни, можна робити висновки про деформацію об'єкта дослідження. Схема струнного тензометра показана на рис. 4.15.

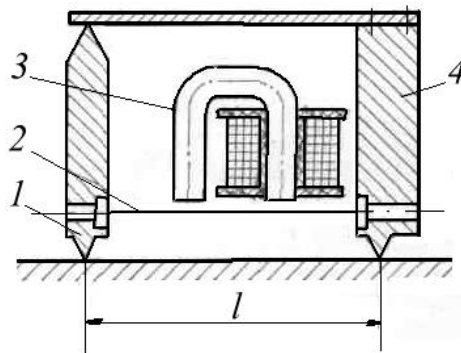


Рис. 4.15 Схема струнного тензометра

Струна 2 з феромагнітного матеріалу закріплена в рухомій 1 і нерухомій опорах 4; її натяг у вихідному стані регулюється за допомогою розрізної втулки, встановленої в нерухомій опорі (на малюнку не показано). Коливання збуджуються електромагнітом 3, який розташовується над струною. При проходженні по його обмотці електричних імпульсів, що подаються від генератора струна коливається і збуджує в обмотці електромагніту синусоїдальні сигнали, які знімаються з виходів.

При визначенні частоти власних коливань струни до і після деформації об'єкта, що досліджується, застосовують три схеми:

- резонансну,
- автоколивальну,
- вимірювання частоти загасаючих коливань.

Залежно від обраної схеми можна забезпечити вимірювання як статичних, так і деформацій, що змінюються з високою швидкістю.

Струнні тензометри забезпечують стабільність вимірювання деформацій протягом досить тривалого часу (до кількох років) при невеликому рівні напружень у струні. Для виготовлення струн використовуються високоякісні сталі з високою міцністю та релаксаційною стійкістю. Абсолютна похибка вимірювання деформації для струнних тензометрів не перевищує 0,0001% [46]. Струнні тензометри є частотними приладами і тому мають переваги за перешкодами перед іншими типами тензометрів. Вони нечутливі до флуктуації напруги живлення, до зміни коефіцієнта посилення, до зміни перехідних опорів сполучних ліній та деяких інших параметрів електричного ланцюга. Ці тензометри допускають багаторазове використання та швидку установку. До їх недоліків слід віднести чутливість до температурних змін, нелінійність теоретичної градуовальної характеристики, а також незадовільну динамічну характеристику.

Найбільшого поширення струнні тензометри набули для вимірювання деформацій у елементах великих гідротехнічних споруд із залізобетону протягом тривалого часу їх експлуатації.

Пневматичні тензометри. Дія цих тензометрів ґрунтується на вимірюванні зміни витрати повітря через вимірювальне сопло, викликане деформацією об'єкта дослідження.

Принципова схема пневматичної недиференційної вимірювальної системи показана на рис. 4.16а [29].

Стиснене повітря від компресора 1 під тиском p надходить у фільтр 2, де очищується від твердих частинок, пилу, олії та вологи, і далі йде - в стабілізатор тиску 3. Тут тиск повітря дещо знижується і підтримується на постійному рівні ($p_0 = const$). Зі стабілізатора повітря подається у вхідне сопло 5 і потім до вимірювального сопла 6, з якого виводиться в атмосферу через отвір L_1 між соплом і заслінкою 7. Камера між стабілізатором і вхідним соплом називається робочою, а тиск p_0 в ній також називається робочим. Камера між вхідним і вимірювальним соплами називається вимірювальною, а тиск p_e у ній - вимірювальним. Тиск у робочій та вимірювальній камерах визначається манометрами 4 і 8.

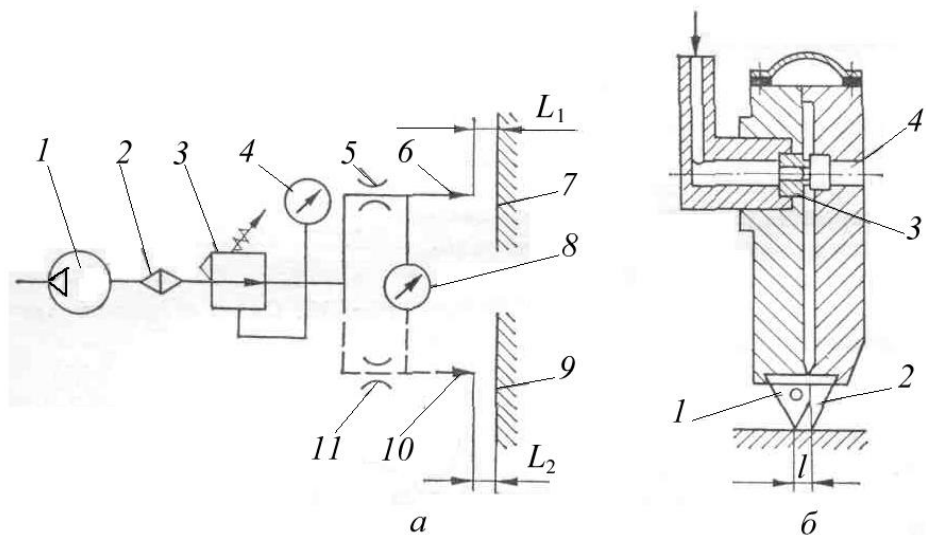


Рис. 4.16 Схема пневматичної вимірювальної системи

Більшою точністю вимірювання, ніж розглянута, відрізняється диференційна вимірювальна система, що складається з двох симетричних вихідних гілок. Вона може бути утворена, як показано на рис. 4.16а, штриховою лінією, шляхом додавання до недиференційної системи вхідного сопла 11, вимірювального сопла 10 і заслінки 9. При цьому джерело живлення, фільтр, стабілізатор тиску є загальними для двох вимірювальних гілок.

У диференційній вимірювальній системі манометр 8 повинен бути також диференційним і реєструвати різницю тиску у двох вимірювальних гілках. У разі рівності діаметрів вихідних отворів вхідних сопел 5, 11 та вимірювальних 6, 10 чутливість обох вимірювальних гілок буде однаковою і різниця тисків між ними залежатиме лише від різниці проміжків L_1 і L_2 . Якщо величина одного з цих проміжків встановлена постійною, а заслінка іншого пов'язана, наприклад, з рухомою опорою пневматичного тензометра, то в процесі деформування об'єкта дослідження, на якому встановлено такий тензометр, відстань між рухомою і нерухомою опорами зміниться, проміжок також зміниться, і зміна витрати повітря буде зафіксована диференційним манометром. Конструкція пневматичного тензометра показана на рис. 4.16б. Деформація поверхні на базі сприймається опорними призмами 1 і 2 і через важіль механічної передачі змінює проміжок між вимірювальним соплом 3 і заслінкою 4. Коефіцієнт перетворення такого тензометра становить до 200000, що забезпечує абсолютну похибку вимірювання не вище 0,00001%. У зв'язку з тим, що пневматичні тензометри є одними з найбільш чутливих, вони в основному знаходять застосування для високоточних вимірювань на малих базах (до 0,7 мм). Пневматичний метод вимірювань знаходить також застосування у високотемпературній тензометрії.

Пневматичні вимірювальні системи поділяються на системи низького (близько $4,9 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^4$ Па) та високого (близько $2 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^5$ Па) тиску, на манометричні та ротаметричні. У **манометричних** системах в якості чутливих елементів для вимірювання витрати використовуються сильфони або рідинні манометри, а в **ротаметричних** - спеціальні індикатори витрати - ротаметри.

До недоліків пневматичних тензометрів можна віднести те, що для забезпечення стабільних показань вони вимагають ретельної фільтрації повітря від пилу та вологи та відсутності у лабораторному приміщенні зовнішніх повітряних потоків.

Електричні тензометри. Дія електричних тензометрів ґрунтується на вимірюванні зміни параметрів електричного ланцюга тензометра або його магнітних характеристик. Для перетворення переміщення опорних призм в електричні сигнали, які передаються на вимірювальні прилади, у цих тензометрах використовуються такі типи перетворювачів [24, 46]:

- опірні,
- ємнісні,
- індуктивні,
- індукційні,
- п'єзоелектричні,
- магнітопружні,
- трансформаторні.

У підгрупу перетворювачів опору, які набули найбільшого поширення для вимірювань входять: потенціометричні, електролітичні, механотронні та резистивні перетворювачі; відзначимо, що резистивні перетворювачі в практиці більше відомі як тензорезистори опору, і саме вони є найбільш розповсюдженим у різних галузях науки і техніки засобом вимірювання різних механічних впливів на матеріальні об'єкти.

Потенціометричні перетворювачі. Принцип дії тензометрів з потенціометричними перетворювачами заснований на вимірюванні зміни опору між повзунком потенціометра, жорстко пов'язаного з об'єктом, що деформується, і його крайнім виводом. У цих тензометрах опорна рухома призма 5 безпосередньо, як показано на рис. 4.17а, або через механічну передачу з'єднана з повзунком 3 змінного резистора (потенціометра) 4.

У процесі деформування досліджуваного об'єкта відстань між рухомою 5 і нерухомою призмами 1 змінюється, і повзунок переміщається відносно резистора, який жорстко пов'язаний з нерухомою опорою.

Довжина резистора, укладена між повзунком і крайнім виводом 2, визначає опір вимірюваного плеча. При подовженні матеріалу повзунок пе-

реміщається праворуч і опір збільшується, а при стисканні – зменшується. Якщо резистор підключити у вимірювальний міст Уїтстона, то для будь-якого положення повзунка, що відповідає вихідному (недеформованому) стану об'єкта, можна шляхом балансування моста поєднати початок відліку деформації з нулем вимірювального приладу. Визначення деформації у цьому разі зводиться до вимірювання вихідної напруги, зміна якої за розбалансу мосту відбувається за рахунок зміни опору резистора. Можна також безпосередньо вимірювати опір між повзунком і крайнім виводом потенціометра, проте цей спосіб визначення деформації методично менш зручний.

У зв'язку з невисокою чутливістю потенціометричні тензометри знаходять застосування лише для вимірювання досить великих деформацій - від 0,1 до 0,5 мм.

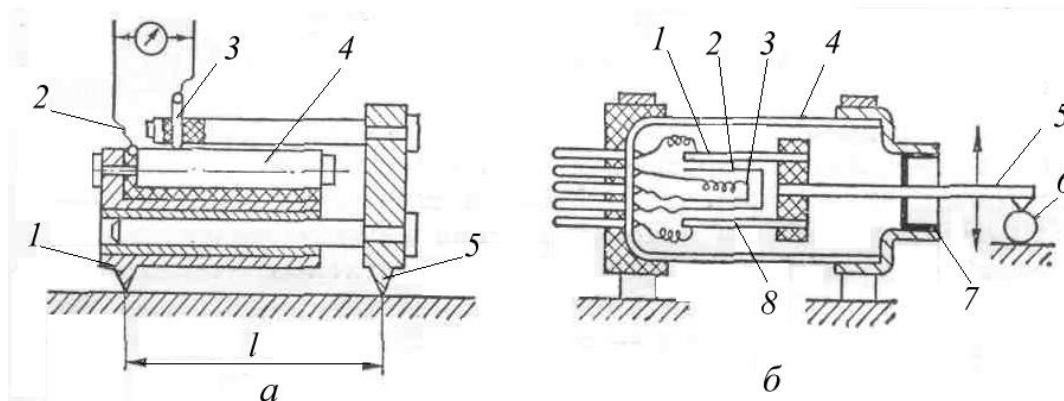


Рис. 4.17 Схеми потенціометричного (а) та механотронного (б) тензометрів

Електролітичні перетворювачі. Принцип дії тензометрів з електролітичними перетворювачами заснований на вимірюванні зміни опору між виходами двох електродів, що знаходяться в електроліті, при зміні відстані між ними в процесі деформування об'єкта дослідження, тобто він такий же, як і у потенціометричних тензометрів. Тому вимірювання деформації за допомогою тензометрів цих двох типів проводиться однаковими способами. Електролітичні тензометри також використовуються для вимірювання досить великих деформацій, однак, вони мають більш обмежене поширення, ніж потенціометричні, через їх недостатню стабільність.

Тензорезистори опору. Принцип їх дії заснований на використанні тензорезистивного ефекту, що характеризує властивість провідникових і напівпровідникових матеріалів змінювати електропровідність та електричний опір при зміні об'єму або напруженого стану [46]. Чутливий елемент тензорезистора виконується у вигляді ґратки з тонкого дроту або фольги, яка по всій своїй довжині нерухомо кріпиться до об'єкта дослідження. Тому при деформуванні поверхні, на якій розміщений тензорезистор, він деформується

разом з нею на однакову величину, а його опір змінюється пропорційно до деформації. Визначення деформації в цьому випадку так само, як і при використанні перетворювачів опору інших типів, зводиться до вимірювання зміни опору тензорезистора або напруги в його вихідному ланцюзі. Питання використання тензорезисторів у макроексперименті більш детально будуть розглянуті у наступному розділі, тому тут ми обмежуємось лише наведеними відомостями та короткою історичною довідкою.

Явище тензорезистивного ефекту у провідниках електричного струму відкрив у 1858 р. відомий англійський вчений Томсон – згодом лорд Кельвін, – який опублікував статтю про результати дослідження залежності електричного опору провідних матеріалів від зовнішніх навантажень.

Основні висновки цієї публікації зводяться до наступного:

– електричний опір всіх провідних матеріалів залежить від навантаження та деформації;

– для різних матеріалів чутливість електричного опору до зовнішнього навантаження різна;

– встановлений ефект дуже слабкий, оскільки зміна електричного опору при зовнішньому навантаженні дуже мала, тому провідникові матеріали потрібно підключати до моста Уїтстона і вимірювати не опір, а вихідну електричну напругу.

Тензорезистивний ефект після відкриття Томсона почав епізодично використовуватися на початку 20 століття із застосуванням як датчиків провідників ненормованих розмірів, і тільки в 1940 р. американський вчений Сімонс запропонував конструкцію тензорезистора, яка не змінювалася до теперішнього часу і завдяки якій сталася технічна революція в тензометрії зі створенням нормативної бази та промисловим випуском тензодатчиків та приладів.

Для вимірювання деформації в твердих тілах застосовуються тензорезистори трьох типів:

- провідникові,
 - дротяні,
 - фольгові,
- напівпровідникові,
- рідкометалеві.

У провідникових тензорезисторах чутливий елемент в основному виконується у вигляді петлеподібних ґраток з дроту або фольги, а в напівпровідникових - у вигляді пластинки монокристалу з напівпровідникового матеріалу. Рідкометалевий тензорезистор є гумовою трубкою великої довжини, заповненою ртуттю.

Як зазначалося, перший дротяний тензорезистор марки SR-4 запропо-нував 1940 р. Симонс; з 1952 р. в Англії почали використовувати фольгові тензорезистори, конструктивно аналогічні дротяним тензорезисторам SR-4.

Напівпровідникові тензорезистори у вигляді платівки з монокристала напівпровідникового матеріалу були розроблені в США в 1957 р., а наприкінці 50-х років – рідкометалеві.

Найбільш широке поширення з розглянутих набули провідникові тензорезистори завдяки низці переваг, які в комплексі забезпечують їх **переваги перед іншими засобами вимірювання деформацій**. Зокрема, вони забезпечують:

- вимірювання деформацій на різних базах від 0,3 до 200 мм;
- вимірювання деформацій у великій кількості точок; сучасні інформаційно-вимірювальні системи, що ґрунтуються на використанні тензорезисторів, містять до декількох десятків тисяч каналів (до 20000...30000 каналів);
- дистанційне вимірювання деформацій;
- вимірювання в широкому інтервалі температур практично від 1,5 до 1100 К;
- вимірювання багатокomпонентних деформацій при плоскому напруженому стані;
- вимірювання в широкому частотному інтервалі від 0 до 100 кГц і вище;
- вимірювання деформацій в умовах неприйнятних для інших засобів вимірювання;
- низьку вартість виготовлення та високу технологічність;
- малу масу до 0,05 г та виключення можливості спотворення умов експлуатації об'єктів дослідження.

У той же час **тензорезистори мають ряд недоліків**, подолання яких забезпечується використанням адекватних технічних рішень та сучасної апаратури. До основних недоліків провідникових тензорезисторів можна віднести:

- неможливість індивідуального тарування; тарування можна виконувати тільки для партії тензорезисторів з однаковими характеристиками з використанням кількох тензорезисторів із цієї партії без можливості їх подальшого відновлення та застосування;
- неможливість багаторазового використання тензорезисторів при тензометруванні пластично деформованих об'єктів дослідження та об'єктів дослідження, що доводяться до руйнування (тензорезистори можуть багаторазово використовуватися лише у складі тензорезисторних перетворювачів механічних величин);

- низьку чутливість щодо зміни електричного опору та низький рівень вихідного електричного сигналу за напругою при використанні вимірювальних схем, зокрема, мосту Уїтстона (в останньому випадку використовуються підсилювачі - тензостанції, що випускаються промисловістю і дозволяють підвищити вихідну напругу до прийняттого рівня).

Необхідно зазначити, що в даний час промисловий випуск дротяних тензорезисторів скоротився, так як переважне застосування при вимірюваннях знаходять фольгові тензорезистори, що мають ряд істотних метрологічних і технологічних переваг перед дротяними.

Ємнісні перетворювачі. Принцип дії тензометрів з ємнісними перетворювачами заснований на вимірі зміни електричної ємності між двома пластинами, взаємне переміщення яких пропорційне деформації, що вимірюється.

Як відомо, ємність плоского конденсатора визначається з співвідношення [19]

$$C = 0,088 \frac{\varepsilon F}{d}, \quad (4.10)$$

де F - діюча площа пластин (обкладок), з яких складається конденсатор; ε - відносна діелектрична проникність (для повітря $\varepsilon = 1$); d - товщина діелектрика або зазору

Зміна ємності перетворювача може відбуватися при взаємному переміщенні пластин за рахунок зміни діючої площі, або відстані між пластинами, або за рахунок зміни діелектричної проникності речовини зазору.

Для вимірювання лінійних і кутових переміщень найбільше застосування отримали перетворювачі на основі зміни площі пластин. Для таких перетворювачів зміну ємності відповідно до виразу (4.10) можна записати так:

$$\Delta C = C_0 - C_1 = 0,088 \frac{\varepsilon}{d} \Delta F = 0,088 \frac{\varepsilon b}{d} \Delta h, \quad (4.11)$$

де C_0, C_1 - ємність до і після вимірювання; ΔF - зміна площі пластини; b - довжина пластини; Δh - зміна ширини діючої площі, яка рівна переміщенню.

При використанні в перетворювачі багатопластинчастих конденсаторів чутливість його збільшується та ємність визначається залежністю

$$C = 0,088 \frac{\varepsilon F(n-1)}{d}, \quad (4.12)$$

де n - повне число пластин обох обкладок.

Для таких перетворювачів залежність зміни ΔC від зміни діючої площі записується з використанням співвідношень (4.11) та (4.12) таким чином:

$$\Delta C = 0,088(n-1) \frac{\varepsilon}{d} \Delta F. \quad (4.13)$$

При використанні циліндричних конденсаторів їх ємність можна розрахувати за формулою

$$C = 0,088 \frac{2\pi\epsilon l^*}{\ln r_{\text{н}} / r_{\text{в}}}, \quad (4.14)$$

де l^* - висота циліндра; $r_{\text{н}}$ і $r_{\text{в}}$ – радіус відповідно зовнішньої і внутрішньої обкладок конденсатора.

Зміна ємності в цьому випадку, як впливає з (4.14), визначається виразом

$$\Delta C = 0,088 \frac{2\pi\epsilon \Delta l^*}{\ln r_{\text{н}} / r_{\text{в}}}, \quad (4.15)$$

де Δl^* - зміна висоти діючої площі, що дорівнює зміщенню.

Ємнісні циліндричні перетворювачі використовуються для вимірювання кутових переміщень. Зазвичай статор таких перетворювачів жорстко закріплений на нерухомій деталі, а ротор контактує з рухомою призмою тензометра.

Ємнісний перетворювач, в основі роботи якого лежить явище зміни діелектричної проникності, може бути виконаний у двох варіантах: з *переміщенням діелектрика перпендикулярно до площини пластин або паралельно їм.*

В якості матеріалу пластин використовуються сплави з малими коефіцієнтами теплового розширення, наприклад такі, як інвар, а для ізолюючих матеріалів - кварцеве скло, що характеризується високим рівнем опору ізоляції.

Тензометрам з ємнісними перетворювачами притаманні такі **недоліки**, як висока чутливість до впливу пилу, вологи, змінної температури, тобто впливу навколишнього середовища. Тому вони набули основного поширення для вимірювання переміщень у середовищах з постійною температурою і переважно застосовуються при лабораторних випробуваннях. Так, для вимірювання деформації зразків при випробуваннях в рідкому гелії (4,2 К) використовується ємнісний тензометр з плоскими паралельними пластинами, схема якого показана на рис. 4.17а [33]. Зразок 3 випробовується на розтяг; навантаження до нього прикладається від захватів 1, до яких паралельно зразку кріпиться корпус тензометра 2, виконаний з фторопласту, що є ізолюючим матеріалом з високою працездатністю при криогенних температурах. До корпусу приклеюються за допомогою холодостійкого клею пластини 4.

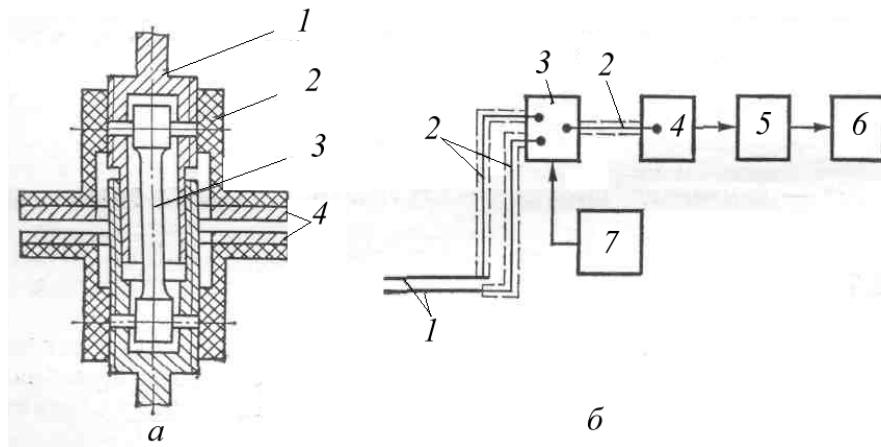


Рис. 4.18 Схеми ємнісного тензометра (а) та його вимірювального ланцюга (б)

У процесі деформування зразка відстань між пластинами збільшується та змінюється ємність перетворювача, величина якої при випробуваннях в рідкому гелії є гіперболічною функцією деформації при великих деформаціях; при дуже малих деформаціях (до 0,005%) ця залежність може прийматись лінійною. Слід зазначити, що ємнісні тензометри характеризуються надзвичайно високою чутливістю до переміщень, з їх допомогою вимірюється деформація до 0,000001% (або 10^{-8} мм/мм) [33] (реальне значення граничної деформації, яку можна визначати ємнісними тензометрами 0,0001%). Схеми підключення перетворювача до вимірювального ланцюга показана на рис. 4.18б. Паралельні пластини 1 за допомогою екранованих проводів 2 з'єднуються з ємнісним мостом 3, до якого підключений звуковий генератор 7. Сигнал з моста також по екранованих проводах передається в частотний фільтр 4 і далі на перетворювач 5. Після перетворювача сигнал надходить на реєструючий прилад 6. Ємність у перетворювачах цього типу з паралельними пластинами змінюється в інтервалі від 5 до 50 пФ, при цьому їх чутливість до деформації становить 0,0001 пФ. Після частотного фільтра зміна ємності перетворюється на зміну постійної напруги (0,1-2 В).

Ємнісні датчики прості за конструкцією і мають високу завадостійкість по відношенню до сильних магнітних полів, проте не завжди використовуються через необхідність застосування високих частот і експлуатаційних труднощів при підключенні довгих кабелів.

Індуктивні перетворювачі. Принцип дії тензометрів з індуктивними перетворювачами заснований на використанні залежності індуктивного та активного опорів котушки від переміщення деталей магнітопроводу, пов'язаних з об'єктом, що деформується.

В індуктивному перетворювачі магнітопровід має кілька розривів, проміжок або площа яких можуть змінюватися при переміщенні рухомого еле-

мента, так званого якоря. Якір жорстко пов'язаний з об'єктом дослідження та при деформуванні останнього переміщається, викликаючи зміну опору магнітного ланцюга та індуктивності котушки, що живиться змінним струмом.

Розрізняють індуктивні датчики зі змінним повітряним проміжком, зі змінною площею магнітопроводу в перерізі розриву та соленоїдного типу [19] (рис. 4.19).

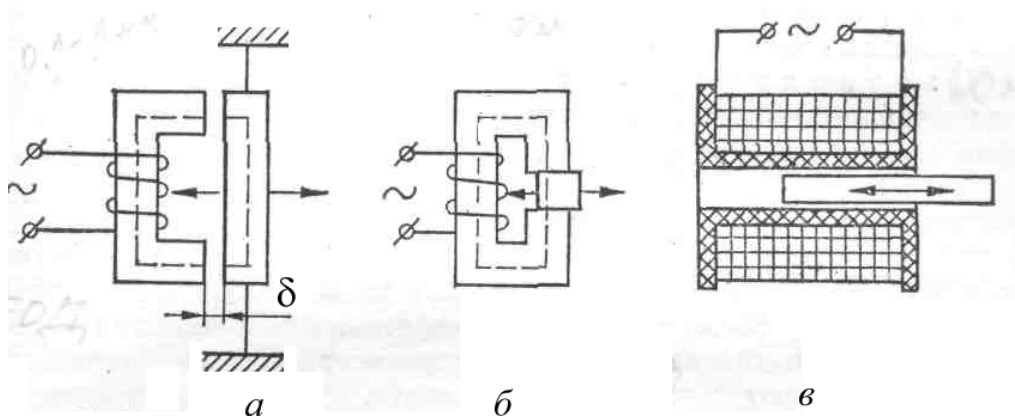


Рис. 4.19 Схема включення індуктивних перетворювачів зі змінним зазором (а), зі змінною площею (б) та соленоїдного типу (в)

Індуктивні перетворювачі зі змінним проміжком характеризуються високою чутливістю і реагують на зміну проміжку в діапазоні 10^{-4} - $5 \cdot 10^{-4}$ мм; вони дозволяють вимірювати переміщення в інтервалі від 0,1 до 1 мм. Для великих переміщень характеристика перетворювача стає суттєво нелінійною. Для розширення діапазону лінійності характеристики в перетворювачах такого типу застосовуються диференційні схеми з двома симетричними сердечниками, розташованими вздовж осі. При переміщенні якір діє на розмір повітряних проміжків обох сердечників і тому зі збільшенням одного проміжку інший зменшується на те ж саме значення. Котушки таких перетворювачів підключаються до мосту Уїтстона.

Індуктивні перетворювачі зі змінною площею дозволяють вимірювати досить великі переміщення - до 8 мм. При цьому вони відрізняються лінійністю у широкому інтервалі переміщень.

Індуктивні перетворювачі соленоїдного типу знаходять широке застосування при вимірюванні великих деформацій на великій базі. В них переміщення в котушці феромагнітного якоря викликає зміну індуктивності обмотки. Тензометри з поздовжнім переміщенням якоря мають базу від 10 до 100 мм, з їх використанням можна вимірювати деформації до 60 мм.

Живлення індуктивних перетворювачів здійснюється змінною напругою синусоїдальної або прямокутної форми частотою від 50 Гц до 20 кГц. Пере-

творювачі з низькочастотним живленням характеризуються великими розмірами, невисокою чутливістю до переміщень якоря, нестабільністю показань при виникненні промислових електромагнітних перешкод і не дозволяють досліджувати швидкоплинні процеси. Тому сучасні індуктивні тензometri живляться струмом частотою 3-15 кГц. Вони слабчутливі до впливу навколишнього середовища і тому використовуються для **тензометрування натурних конструкцій та споруд** в умовах експлуатації.

Індукційні перетворювачі. Їх дія заснована на відомому ефекті виникнення електрорушійної сили (ЕРС) у котушці при переміщенні в ній магніту або переміщенні котушки в магнітному полі. Індукційні перетворювачі відносяться до групи генераторних перетворювачів і в основному використовуються для вимірювання швидкості деформування при динамічному навантаженні. Таке застосування індукційних перетворювачів обумовлено тим, що ЕРС, що реєструється на виходах котушки, пропорційна швидкості переміщення магнітного поля відносно її витків [19].

П'єзоелектричні перетворювачі. Дія тензометрів з п'єзоелектричними перетворювачами ґрунтується на використанні прямого п'єзоелектричного ефекту, відкритого в 1880 р. Ж. Кюрі та П. Кюрі, який полягає у виникненні поляризації діелектрика під дією механічних напружень (виникнення механічних деформацій під дією електричного поля називають зворотним п'єзоелектричним ефектом, зворотний ефект використовується в системах збудження високочастотних машин для випробувань на втому). П'єзоелектричний ефект мають кристали деяких природних мінералів, таких, як кварц або турмалін, а також діелектрики промислового виготовлення - сегнетова сіль, фосфат амонію, дигідрофосфат калію та інші. Широке застосування в тензometрах з п'єзоелектричними перетворювачами отримали п'єзокераміки з сегнетоелектриків - титанат барію та його композиції, ніобати, цирконат-титанат свинцю та інші, які мають високий п'єзомодуль і характеризуються досить високою механічною міцністю.

П'єзокерамічні датчики головним чином використовуються для вимірювання параметрів швидкоплинних процесів і так само, як індукційні перетворювачі, є генераторними перетворювачами. Основними **їх перевагами** перед іншими типами перетворювачів є висока чутливість та жорсткість, простота конструкції, низька вартість, висока надійність та дуже великий діапазон конструктивних можливостей. Крім того, на відміну від інших датчиків п'єзоелектричні перетворювачі мають високу радіаційну стійкість. **До їх недоліків** можна віднести те, що у звичайному виконанні вони не можуть застосовуватися для вимірювань при статичному навантаженні, так як електричний заряд, що виникає на електродах п'єзоелемента, стікає з них за

експоненційним законом на всіх опорах виток, включаючи вхідний опір вольтметра. Для вимірювання статичних навантажень штучно створюються умови роботи п'єзоелемента, еквівалентні динамічному режиму завдяки збудженню в ньому механічних коливань за допомогою генератора, налаштованого на резонансну частоту п'єзоелемента [44].

П'єзоелектричний перетворювач - датчик представляє собою вирізану з кристала пластинку, на протилежних поверхнях-гранях якої напилені провідні плівки-електроди. При стисканні п'єзоелектричної пластинки тиском p на гранях виникають заряди, величина яких пропорційна тиску і залежить від d - величини п'єзомодуля ($Q = pd$). Поява заряду на електродах викликає зміну їх потенціалу, який може бути виміряний електронним вольтметром, що має великий вхідний опір. Робочий частотний діапазон п'єзоелектричних перетворювачів - від кількох десятків герц до десятків мегагерц. Вони найбільш придатні для вимірювання знакозмінних процесів. Однополярні процеси за наявності постійної складової ними не реєструються через швидке зникнення заряду. Найбільше застосування для виготовлення пластин п'єзоелементів нині знаходять кварц і металокераміка з титанату барію, цирконату-титанату свинцю та ніобату свинцю. Титанат барію характеризується високим п'єзомодулем і працездатністю в інтервалі температур від 223 до 373 К, за межами якого поляризація починає зникати (для порівняння відзначимо, що у кварцу п'єзоефект зникає за температури приблизно 850 К). Параметри п'єзокераміки на основі цирконату-титанату свинцю та ніобату свинцю більш стабільні, ніж у титанату барію, проте їх п'єзомодуль, а отже, і чутливість нижча.

Для вимірювань за статичного навантаження використовують два типи перетворювачів, технологічні коливання яких збуджуються за допомогою звукових генераторів. Це біморфні перетворювачі, що складаються з двох розділених струмопровідною заземленою прокладкою ідентичних п'єзоелементів, один з яких підключений до збуджуючого генератора, а інший - до вимірювального приладу, і перетворювачі з акустичним імпедансом (активний і реактивний опір), що змінюється. В останніх, які представляють собою один монолітний п'єзоелемент, під дією вимірювального навантаження змінюється імпеданс акустичного середовища, що викликає зміну електричних параметрів. Перетворювачі цього типу вільні від багатьох недоліків, властивих біморфним перетворювачам, і тому останнім часом знаходять дедалі більше застосування як датчики у системах вимірювання різних механічних величин при статичних випробуваннях.

Перетворювачі лінійних і кутових переміщень, що використовуються в тензометрах, будуються на основі розглянутих типів перетворювачів. На

рис.4.20 показана конструкція перетворювача контактного типу з п'єзоелектричним резонатором вимірювання деформацій.

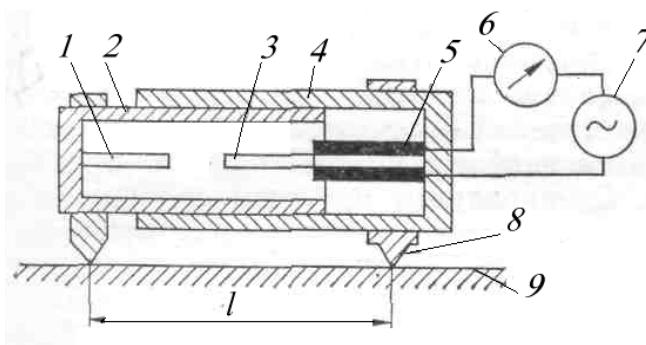


Рис. 4.20. П'єзоелектричний перетворювач контактного типу

П'єзоелемент 5 перетворювача закріплений на умовно нерухомій частині корпусу 4. До кінця приєднаний магніт 3. До торця рухомої частини корпусу 2 приєднаний другий магніт 1 співвісно з першим. Якщо магніти спрямовані один до одного однойменними полюсами, то при деформуванні поверхні об'єкта 9, на якому встановлений тензометр за допомогою призми 8, циліндричні частини корпусу 2 і 4 взаємно зміщуватимуться, на п'єзоелемент почне діяти стискаюче зусилля, пропорційне відстані між магнітами. Динамічний режим роботи п'єзоелемента при його коливаннях на резонансній частоті забезпечується генератором 7, а вимірювання електричного струму в ланцюзі - приладом 6. *П'єзоелектричні перетворювачі незамінні для використання у вимірвальних системах, які повинні експлуатуватися в умовах високих температур, при дії агресивних середовищ та реакторного випромінювання.*

4.2.2 Дротяні, фольгові і напівпровідникові тензорезистори; коефіцієнт тензочутливості

Дротяні тензорезистори. З часу виготовлення перших дротяних тензорезисторів марки SR-4 (вони називаються також тензодатчиками) пройшло кілька десятиліть, але завдяки вдалій конструкції їх принципова схема не змінилася (рис. 4.21а).

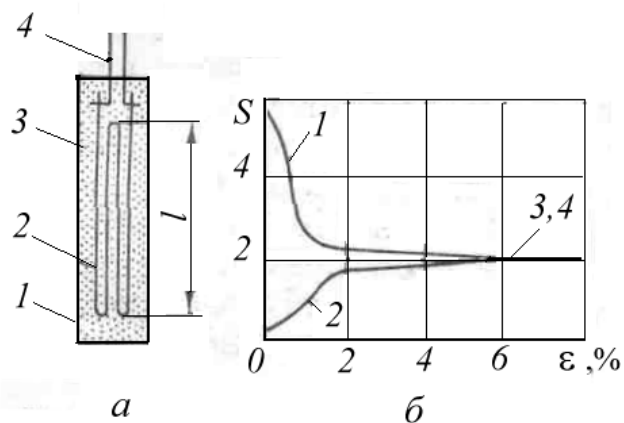


Рис. 4.21 Схема тензорезистора опору (а) та залежність чутливості дроту від деформації (б)

Дротяний тензорезистор складається з таких елементів: основи 1, що представляє собою пластинку з електроізоляційного матеріалу, чутливого елемента 2, виготовленого зі спеціального реостатного дроту, зміна опору якого залежить від його деформації, і виходів 4, за допомогою яких чутливий елемент підключається сполучним проводом до вимірювальної схеми. Виходи кріпляться до реостатного дроту за допомогою точкового зварювання або пайки. Пластинки основи з двох сторін приклеюються вяжучим 3 до чутливого елемента тензорезистора і склеюються між собою вільною від дроту поверхні. Таким чином, тензорезистор опору є тришаровою конструкцією, що складається зі скріплених вяжучою речовиною двох шарів основи, між якими розміщена дротяна решітка з виходами. Основа тензорезистора служить для електроізоляції чутливого елемента від металевої поверхні, деформація якої досліджується, а також для кріплення його по всій довжині цієї поверхні. Якщо основа виконана з паперу або синтетичної плівки, вона приклеюється до поверхні об'єкта по всій площі тензорезистора. При деформуванні об'єкта клеюча речовина та основа передають розтягування або стиснення реостатному дроту, що призводить до зміни величини його опору, який можна виміряти та визначити деформацію. Чутливість тензорезистора до деформації, що характеризує рівень прояву тензорезистивного ефекту, оцінюють за допомогою коефіцієнта тензочутливості. Цей коефіцієнт встановлює зв'язок між відносною зміною опору і відносною деформацією у напрямку вимірювань у вигляді

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad (4.16)$$

Для прямолінійного дроту залежність повного омичного опору R від його розмірів та питомого опору описується таким співвідношенням:

$$R = \rho \frac{l}{F}, \quad (4.17)$$

де ρ – питомий опір; F – площа поперечного перерізу.

Якщо дріт розтягнути, то його довжина, площа поперечного перерізу та питомий опір зміняться. Тоді на підставі рівняння (4.17) для малого збільшення відносного опору можна записати [45]]

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta F}{F}. \quad (4.18)$$

Так як деформація $\varepsilon = \Delta l / l$, а об'єм дроту $V = Fl$, для зміни об'єму можна записати

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta F}{F} + \varepsilon. \quad (4.19)$$

При зміні об'єму матеріалу його щільність змінюється і викликає зміну питомого опору, тому з урахуванням виразу (4.19) отримаємо

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta F}{F} + \varepsilon. \quad (4.20)$$

Підставивши в рівняння (4.18) вираз (4.20), отримаємо, що зміна опору визначається тільки деформацією і дорівнює її подвоєному значенню:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta F}{F} + \varepsilon + \varepsilon - \frac{\Delta F}{F} = 2\varepsilon. \quad (4.21)$$

Гіпотеза, описана рівнянням (4.20), справедлива не для всіх матеріалів і зміна питомого опору не завжди пропорційна зміні об'єму, тому правильніший запис виразу (4.21) у вигляді, аналогічному виразу (4.22):

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon. \quad (4.22)$$

Крім того, в реальному тензорезисторі з петлевою решіткою є криволінійні ділянки реостатного дроту, які практично нечутливі до осової деформації. Їх опір змінюється лише за деформування датчика в поперечному напрямку. Тому значення S , що відноситься до всього тензорезистора, для датчика з петлевою решіткою нижче, ніж для прямолінійного дроту. Значення коефіцієнта тензочутливості для найпоширеніших провідникових та напівпровідникових тензочутливих матеріалів наведено у табл. 4.2 та 4.3 [24, 46]. Найчастіше для виготовлення провідникових тензорезисторів використовуються константан, ніхром і едванс, для яких коефіцієнт тензочутливості близький або дорівнює 2. До матеріалів, що використовуються для чутливих елементів, пред'являються специфічні вимоги. Вони повинні мати [46]:

- високу і стабільну тензочутливість;

- лінійну залежність між деформацією та зміною опору в широкому діапазоні деформацій;
- високий питомий електричний опір, що дозволяє отримувати малобазні тензорезистори з великим омичним опором;
- низький температурний коефіцієнт питомого опору, що сприяє зменшенню температурної похибки вимірювань;
- хорошу технологічність при механічній обробці;
- високу структурну стабільність;
- стійкість проти окиснення;
- механічну міцність.

Таблиця 4.2 Характеристики провідникових тензочутливих сплавів [24]

Матеріал	Склад, %	S	$\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·м	Температурний коефіцієнт опору ($\times 10^{-6}$), K^{-1}	Температурний коефіцієнт лінійного розширення ($\times 10^{-6}$), K^{-1}	Максимальна робоча температура, К
Константан, едванс	60 <i>Cu</i> , 40 <i>Ni</i>	2,0	0,44-0,52	5	12,5	673
Манганін	2-4 <i>Ni</i> , 84-85 <i>Cu</i> , 11-13 <i>Mn</i>	1,0	0,43-0,45	20-30	18,1	Немає даних
Ніхром	80 <i>Ni</i> , 20 <i>Cr</i>	2,1-2,3	1-1,1	130	16,6	1273
Карма	74 <i>Ni</i> , 20 <i>Cr</i> , 3 <i>Fe</i> , 3 <i>Al</i>	2,0	1,6	200	Немає даних	Немає даних
Платина	100 <i>Pt</i>	4,8	0,1	2500	8,9	1573
Платино-іридій	80 <i>Pt</i> , 20 <i>Ir</i>	6,0	0,36	1700		

Таблиця 4.3 Характеристики напівпровідникових матеріалів в стані постачання [46]

Матеріал	Напрямок кристалів	Тип провідності	ρ , Ом·м	ϵ , %	S	Температурний коефіцієнт опору ($\times 10^{-5}$), K^{-1}	Температурний коефіцієнт лінійного розширення ($\times 10^{-5}$), K^{-1}	Компоненти
Кремній (монокрист-	[111]	p	0,02	0,3-0,6	175	130	От -0,05 до 0,40	<i>Si</i>

тал)								
Кремній (монокристал)	[100]	<i>n</i>	0,35	0,3- 0,6	-133	600	От -0,05 до 0,40	<i>Si</i>
Германій (дендрит)	-	<i>p</i> <i>n</i>	1,00 0,25	0,1 0,1	102 -157	300-800 150	0,01-0,60 0,01-0,60	<i>Ge</i> <i>Ge</i>
Технічний вісмут	-	-	-	0,6	22	100	1,2-1,6	<i>Bi</i>

Матеріал дроту також повинен бути хімічно нейтральним по відношенню до сполучного матеріалу і не мати термоелектричних ефектів у місцях паяння зі сполучними проводами. Найбільшою мірою цим вимогам при помірних температурах відповідають сплави міді з нікелем – константан і едванс, а за високих – сплав нікелю з хромом – ніхром. Ці сплави характеризуються досить високою та стабільною чутливістю до деформацій у широкому інтервалі їх значень.

Відповідні залежності коефіцієнта тензочутливості для константану 3 та едвансу 4 на графіках практично горизонтальні (рис. 4.21б), при цьому коефіцієнт тензочутливості для константанового дроту практично не змінюється до руйнування. Для порівняння на цьому ж малюнку наведені аналогічні залежності для платиноїридію 1 і манганіну 2, чутливість яких до деформацій змінюється зі зміною вимірюваної деформації. У сучасній тензометрії для виготовлення чутливих елементів тензорезисторів використовується дріт діаметром 0,002-0,03 мм.

Матеріал основи повинен задовольняти жорстким вимогам за такими властивостями, як міцність, гнучкість, вологостійкість, опір повзучості; він повинен також забезпечувати надійну електричну ізоляцію дроту та зберігати в робочому температурному інтервалі високу стабільність перерахованих властивостей. Цим вимогам у нормальних умовах задовольняє тонкий цигарковий папір (0,05-0,10 мм) або плівки, виготовлені з полімеризуючих клеїв і лаків, які володіють при товщині 0,03-0,04 мм кращою, ніж папір, вологостійкістю, міцністю та великим електроопором ізоляції. При тривалих випробуваннях плівка також має найкращі показники; її повзучість у два-три рази менша і тому забезпечується більш висока стабільність показань тензорезисторів.

В якості основи при температурах до 525 К використовують спеціальний жаростійкий папір, просочений жаростійким клеєм. Для вимірювань при більш високих температурах, аж до 1100 К, дротяні ґратки кріплять за допомогою спеціального жароміцного цементу до фольги з нержавіючої сталі, що

є основою, яку приварюють точковим зварюванням до об'єкта, що досліджується. При дуже високих температурах також застосовуються тензорезистори без основи, які прикріплюються до поверхні об'єкта високотемпературним цементом.

Виходи тензорезисторів зазвичай виготовляють з мідного дроту діаметром 0,12-0,15 мм і довжиною 10-80 мм.

Розсіювання тепла у дротяних тензорезисторах недостатнє, тому робочий струм у них не перевищує 30 мА, а вихідний сигнал дуже слабкий.

До основних характеристик тензорезистора відносять його опір та база, від яких залежать чутливість та точність вимірів. Найбільш широко поширені дротяні тензорезистори з базою 1-20 мм і з фіксованими опорами 50, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400 та 600 Ом. Для датчиків з петлевою решіткою коефіцієнт тензочутливості зберігає сталість при базах з нижньою межею до 10 мм, при подальшому зменшенні бази до 1 мм він різко зменшується. Це пов'язано з сумірністю при малих базах довжини дроту на поздовжніх і поперечних ділянках решітки. Датчики з безпетлевими ґратками характеризуються практичною сталістю коефіцієнта тензочутливості на базах, більших 5 мм; у датчиків з меншою базою він незначно збільшується. Маса тензорезистора з базою 1-20 мм не перевищує 0,05 г.

Чутливий елемент тензорезистора – ґратка – може мати різну конфігурацію, виконуватися петлевою, безпетлевою багатодротовою та однодротовою, плоскою та двошаровою. Розрізняють одноелементні та багатоелементні тензорезистори.

Дротові тензорезистори відрізняються простотою виготовлення та широкими можливостями. Основний їх недолік обумовлений технологічними труднощами, що виникають при виготовленні ґратки складних форм, а також решіток з базами меншими 3 мм. У зв'язку з тим, що у тензорезисторів з плоскими петлевими ґратками при малих базах також значно зростає поперечна чутливість, їх чутливий елемент при базах, менших 3 мм, як правило, оформляється в однодротовому виконанні або двошаровому.

Основні п'ять типів одноелементних дротяних тензорезисторів показано на рис. 4.22 [46].

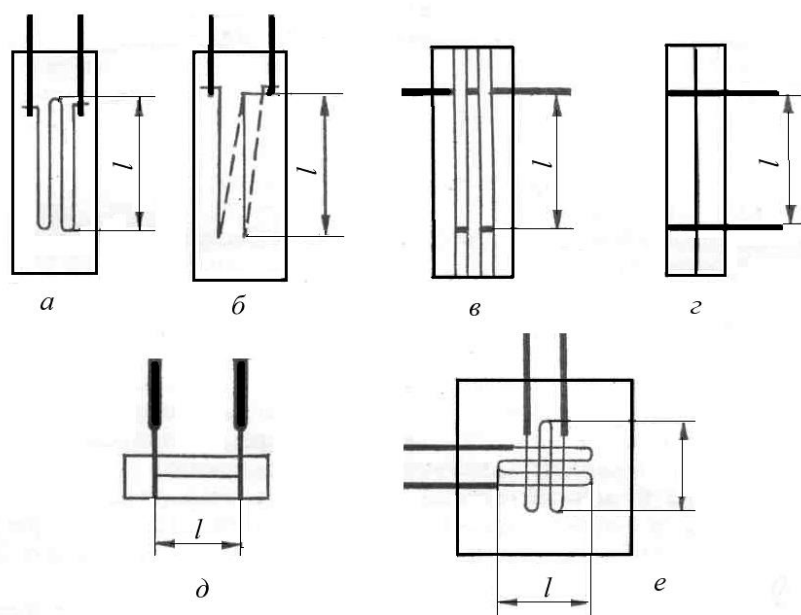


Рис. 4.22 Схеми дротяних тензорезисторів з петльовими ґратками (а, б), безпетлевими ґратками (в), однодротяних (г, д) та двоелементного тензорезистора (е)

Це тензорезистори загального призначення з плоскими петльовими ґратками з дроту діаметром 0,01 - 0,03 мм з базами від 2 мм і більше (рис. 4.22а); тензорезистори з двошаровими петльовими ґратками, що використовуються для вимірювань при великих градієнтах деформацій, які виготовляються з дроту діаметром 0,01-0,03 мм, їх база становить 1-3 мм (рис. 4.22б); тензорезистори з плоскою безпетлевою багатодротовою решіткою з дроту діаметром 0,01-0,03 мм з базами від 3 мм і більше (рис. 4.22в); тензорезистори безпетлеві однодротяні з дроту діаметром 0,01-0,02 мм з базами від 10 мм і більше (рис. 4.22г); тензорезистори безпетлеві однодротяні з базами від 1 до 3 мм, виготовлені з жил литого мікропроводу діаметром 0,002-0,006 мм (рис. 4.22д).

Безпетлеві тензорезистори порівняно з петльовими мають більш високі метрологічні характеристики завдяки кращим умовам передачі деформації до резисторного дроту, які реалізуються у зв'язку з тим, що ці тензорезистори вільні від поперечної чутливості. Розміри бази безпетлевих тензорезисторів не мають обмежень з технологічних та метрологічних причин. У позначенні марки дротяного тензорезистора входять його основні технічні характеристики. Наприклад, марка ПКБК-5-100 означає: тензорезистор дротяний (П) константановий (К) на паперовій основі (Б) з конденсаторного (К) паперу з базою 5 мм та опором 100 Ом. Коефіцієнт тензочутливості вказується для партії тензорезисторів однакової бази та з однаковими характеристиками.

Одноелементні тензорезистори дозволяють кожен окремо вимірювати лише лінійну деформацію.

Багатоелементні тензорезистори застосовуються, коли в одній точці необхідно виміряти деформації в декількох напрямках. Вони утворюються із двох, трьох або чотирьох тензочутливих елементів, об'єднаних загальною основою; їх називають розетками. Такий двоелементний тензорезистор – розетка показана на рис. 4.22e; він утворений двома розташованими під кутом 90° плоскими петлевими ґратками.

Фольгові тензорезистори. Ці тензорезистори набули широкого поширення в останні десятиліття. Їх чутливий елемент (решітка) виготовляється з тонколистового металу (фольги) товщиною 0,002-0,010 мм. У масовому виробництві для фольгових тензорезисторів використовуються ті ж самі матеріали, що й для дротяних – константан для кімнатних умов і ніхром для підвищених температур. Основою тензорезистора є плівка із синтетичної смоли.

Фольгові тензорезистори мають кращі в порівнянні з дротяними тензорезисторами метрологічні характеристики, допускають виготовлення ґратки практично будь-яких необхідних розмірів і форми в одноелементному та розеточному виконанні. На відміну від дротяних у фольгових тензорезисторах перехідні ділянки на витках петльової решітки виконуються не круглого, а прямокутного перерізу з шириною в напрямку поздовжніх смужок у кілька разів більшої ширини цих смужок. Крім того, плоска фольгова решітка, товщина якої для датчиків серійного виробництва значно менше діаметра резисторного дроту, надійніше і по більшій, ніж дротяна решітка, площі приклеюється до основи. Завдяки цьому можна збільшити площу контакту чутливого елемента фольгового тензорезистора з поверхнею досліджуваного об'єкта, що забезпечує підвищення стабільності і надійності вироблених вимірювань і дозволяє завдяки гарному відводу тепла від решітки підвищити робочий струм до 150 мА у порівнянні з 30 мА а отже, збільшити сигнал і підвищити чутливість датчика.

Фольгові тензорезистори виготовляються з базами від 0,3 мм та більше. Технологічний процес їх виробництва на сучасних підприємствах повністю автоматизований і забезпечує їх виготовлення з високою точністю, при цьому використовуються два методи виготовлення решітки – травлення на тонкій металевій фользі та штампування прецизійними вирубними штампами з фольги.

Для вимірювання великих (до 9-11%) пластичних деформацій в агресивних середовищах при температурах до 600 К застосовуються тензорезистори з ґратками з фольги титанового сплаву, коефіцієнт тензочутливості яких становить 0,2.

Фольгові тензорезистори так само, як і дротяні, виготовляються в одноелементному та багатоеlementному виконанні. Принцип їх маркування аналогічний застосовуваному для дротяних тензорезисторів.

Точність вимірювань провідниковими тензорезисторами досягає 5 ОВД.

4.3 Вимірювальні схеми, тензометрична апаратура, автоматизація і індикація вимірювань

4.3.1 Основні вимірювальні схеми тензометричної апаратури

Для вимірювання зміни опору тензорезисторів у процесі деформування використовуються дві схеми – потенціометрична та мостова. Фактично обидві ці схеми дозволяють вимірювати зміну не опору, а напруги. Потенціометричну схему включення тензорезистора в електричний ланцюг показано на рис. 4.23а [24].

У цій схемі тензорезистор $R1$ послідовно включений з баластним опором $R2$; живлення ланцюга здійснюється постійним струмом від джерела живлення V_n . Якщо опір тензорезистора зміниться, то на його кінцях крім постійної напруги V з'явиться перемінна складова ΔV , яка пропорційна зміні опору і значно менше V . Для того щоб на виході схеми вимірювати тільки змінну складову напруги, вимірювальний прилад B підключається до тензорезистора через конденсатор C .

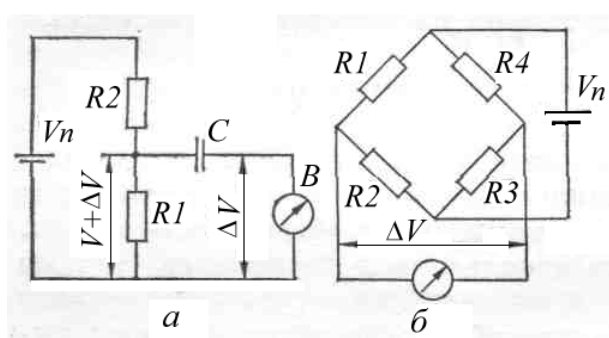


Рис. 4.23 Потенціометрична (а) і мостова (б) схеми включення тензорезисторів

Потенціометрична схема в такому виконанні може застосовуватися в основному для вимірювання динамічних деформацій, коли використовуються підсилювачі змінного струму, що реагують тільки на зміну ΔV .

Так як $\Delta R = S_1 \varepsilon R$, то для ΔV на виході схеми можна записати залежність [24]

$$\Delta V = I_0 S_1 \varepsilon \frac{R_1}{1 + R_1 / R_2}, \quad (4.23)$$

де I_0 – струм живлення.

З аналізу залежності (4.23) випливає, що для забезпечення максимальної чутливості потенціометричної схеми струм у ланцюгу повинен бути якомога більшим (його значення визначається конструкцією тензорезистора та типом чутливого елемента), а відношення R_1 / R_2 близьким до нуля.

Якщо використовується рівноплечова схема, що складається з двох однакових тензорезисторів, то $R_1 / R_2 = 1$ вираз (4.23) спрощується:

$$\Delta V = \frac{1}{2} I_0 S_1 \varepsilon R_1 = \frac{1}{2} I_0 \Delta R$$

Така потенціометрична схема достатньо надійно вимірює деформації в інтервалі від 2 до 10 %.

Для забезпечення стабільності вимірювань у таких схемах повинні використовуватися джерела живлення V_n , що забезпечують строгу сталість напруги.

Більш широке поширення в тензометрії набула мостова схема, яка називається на ім'я її творця - міст Уїтстона, (рис. 4.23б). Міст складається з чотирьох послідовно з'єднаних по замкнутому контуру опорів R_1, R_2, R_3, R_4 , які на зображеній схемі утворюють квадрат або ромб. В одну діагональ квадрата підключають джерело живлення, а до іншої – прилад вимірювання. Сторони моста Уїтстона називаються плечима. Плече моста може складатися з одного чи кількох опорів. Кожен із опорів моста може бути замінено тензорезисторами. Залежно від кількості тензодатчиків у схемі розрізняють методи вимірювань з одним активним плечем, двома чи чотирма.

Для такої мостової схеми можна записати

$$\Delta V = V_n \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (4.24)$$

При $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ як випливає із співвідношення (4.24), отримаємо $\Delta V = 0$, незважаючи на наявність напруги на вході; це означає, що міст перебуває у стані електричної рівноваги чи, як кажуть, міст збалансований.

Розглянемо залежність вихідної напруги від зміни опорів R_1 тензорезистора для мосту з одним активним плечем (якщо на виході мосту різниця потенціалів не дорівнює нулю і по вимірювальному ланцюгу проходить струм,

то міст називається неврівноваженим, або незбалансованим). Якщо в процесі деформування опір тензорезистора зміниться і стане рівним $R_1 + \Delta R$, то вихідна напруга при рівності R_1, R_2, R_3 і R_4 буде:

$$\Delta V = V_{\text{п}} \frac{(R_1 + \Delta R) R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R + R_2)(R_3 + R_4)} = V_{\text{п}} \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \approx V_{\text{п}} \frac{\Delta R}{4R}. \quad (4.25)$$

Зі співвідношення (4.25) випливає, що вихідна напруга пропорційна ΔR . Це справедливо за $\Delta R \ll R$. Якщо ΔR можна порівняти з R , що може мати місце при вимірі великих деформацій або при високій тензочутливості датчика, то лінійність порушується. Однак лінійність цієї залежності в мостовій схемі можна забезпечити, якщо тензорезистори включити в два або чотири активних плеча моста.

З урахуванням того, що $\Delta R/R = S\varepsilon$, вираз (4.25) можна перетворити на вигляд

$$\Delta V = \frac{1}{4} V_{\text{п}} S\varepsilon. \quad (4.26)$$

З виразу (4.26) випливає, що вихідна напруга моста не залежить від опору і пропорційна напрузі джерела живлення, тензочутливості датчика та деформації. Якщо, наприклад, $V_{\text{п}} = 1\text{В}$, $S = 2$, а деформація $\varepsilon = 0,1\%$, то $\Delta V = 0,5\text{ мВ}$. Отже, вихідна напруга моста з тензорезисторами незначна і для її вимірювання необхідно використовувати підсилювачі.

По виду симетрії плечей розрізняють несиметричні мости, коли $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$; симетричні щодо вимірювальної діагоналі (перший вид симетрії), коли $R_1 = R_2 = R$ і $R_3 = R_4 = R_n$; симетричні щодо живильної діагоналі (другий вид симетрії), коли $R_1 = R_4 = R$ і $R_2 = R_3 = R_m$; мости із взаємною симетрією, чи рівноплечові мости (третій вид симетрії), коли $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$.

В електротензометрії застосовуються лише симетричні мости [24] і за статичного, і за динамічного навантаження.

4.3.2 Тарування тензорезисторів, клеї і методи наклеювання тензорезисторів, температурна компенсація похибок вимірювання

Клеї та наклейка тензорезисторів. Для отримання достовірних результатів вимірювань дуже важливим є правильний вибір клеючих речовин, за допомогою яких тензорезистори кріпляться до поверхні деталі або зразка. Деформування досліджуваної поверхні повинно повністю відтворюватися деформуванням чутливого елемента тензорезистора, тому властивості клеїв повинні бути стабільними в часі при різному характері навантаження і ви-

ключати можливість ковзання або зміщення решітки відносно досліджуваної поверхні. Клеї повинні характеризуватись високою адгезійною міцністю, термостійкістю, вологостійкістю та необхідними електроізоляційними властивостями після затвердіння. Бажано, щоб вони швидко схоплювалися в нормальних умовах і не вимагали складної температурної обробки. При виборі клею насамперед слід враховувати сумісність властивостей клею з властивостями матеріалу основи тензорезистора та матеріалу об'єкта дослідження. Клей не повинен пошкоджувати матеріал основи та об'єкта, він має бути хімічно нейтральним.

Клеї, що застосовуються в тензометрії ділять на дві групи:

- клеї гарячого затвердіння, які полімеризуються при підвищених температурах і найчастіше змінюються за складним режимом;

- клеї холодного затвердіння, що полімеризуються за кімнатних умов.

Деякі клеї гарячого затвердіння в умовах дуже тривалої витримки піддаються полімеризації і за кімнатної температури.

До клеїв холодного затвердіння відносяться целулоїдний (3 - 5% розчин целулоїду в комплексному розчиннику або ацетоні), поліметилакриловий (1-3% розчин оргскла в дихлоретані), карбінольний (97-99% карбінольний сироп) та затверджувач – перекис бензолу 1-3 %), ціакрин ЕО (однокомпонентний ціанакрилатний).

До клеїв гарячого затвердіння відносяться різні клеї на основі синтетичних смол та кремнійорганічних сполук, у тому числі БФ-2; БФ-4; БФР-2, ФА-24; ВК-10; ВН-12 і т. д., а також клеї, що є сумішшю лаків з розчинниками, такі, як ВЛ-4 і ВЛ-931 [46].

Коефіцієнт тензочутливості тензодатчиків визначається експериментально в процесі їх тарування на пружних елементах, деформацію яких при пружному деформуванні можна визначити за показаннями тензометрів або індикаторів годинного типу, або розрахувати з використанням нескладних формул опору матеріалів, за результатами непрямих вимірювань:

$$S = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (4.27)$$

Найбільш методично відпрацьовані питання тарування тензорезисторів при чистому згині призматичного бруса, закріпленого на двох опорах, або при консольному згинанні бруса рівного опору згину. Тензорезистори наклеюються на поверхню бруса за технологією, що застосовується при їх наклеїці на об'єкт дослідження, для тензометрування якого використовуються датчики з тієї ж партії, що і для тарування.

При чистому згині бруса його прогин визначається дослідним шляхом за допомогою індикаторів годинного типу з ціною розподілу 0,01 або 0,001 мм,

а деформація зовнішніх волокон, до яких приклеєні тензорезистори, розраховується за цими вимірними значеннями прогину таким чином:

$$\varepsilon = 4f \frac{h}{l^2}, \quad \varepsilon = \frac{Pah}{2EJ}, \quad (4.28)$$

де f – стріла прогину двухопорного бруса за чистого згину; l – його проліт; h – товщина бруса, a – відстань від опори до перерізу прикладення навантаження P , J – осьовий момент площі перерізу бруса.

Для випадку консольного згину бруса рівного опору згину аналогічні співвідношення мають вигляд

$$\varepsilon = \frac{3}{2} f \frac{h}{l^2}; \quad \varepsilon = \frac{Plh}{2EJ}; \quad f = \frac{Pl^3}{3EJ}, \quad (4.29)$$

де l – відстань від перерізу прикладання сили, в якому вимірюється прогин f , до середнього перерізу приклеєного на поверхні бруса тензодатчика.

Ширину пружного елемента - бруса приймають рівною 20-30 мм для наклейки декількох тензорезисторів, а висоту - 8÷10 мм. Точність розрахунку деформації залежить від площинності всіх граней бруса, і навіть від паралельності протилежних і взаємної перпендикулярності сусідніх граней бруса, тобто від точності його виготовлення. Допуск на непаралельність встановлюється не більше $\pm 0,0025$ і по товщині не більше $\pm 0,01$ мм [46].

За результатами розрахунку за формулами (4.28), (4.29) та результатами вимірювання з використанням мосту опорів для кількох тензорезисторів визначається за формулою (4.27) середній коефіцієнт тензочутливості, який приймається постійним для всієї партії тензорезисторів.

Температурна компенсація. При проведенні тривалих випробувань зміна температури об'єкта дослідження і навколишнього середовища може стати причиною появи похибок вимірювання. Коливання температури в процесі експерименту викликають зміну довжини дроту чутливого елемента тензорезистора:

$$\frac{\Delta l_1}{l} = \alpha_1 \Delta T, \quad (4.30)$$

зміна довжини матеріалу об'єкта на базі датчика:

$$\frac{\Delta l_2}{l} = \alpha_2 \Delta T, \quad (4.31)$$

а також зміна температурного коефіцієнта опору матеріалу тензорезистора:

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T, \quad (4.32)$$

де Δl_1 і Δl_2 – абсолютні видовження чутливого елемента і матеріала об'єкта на базі l тензорезистора;

α_1 і α_2 – температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу тензорезистора та об'єкта;

γ – температурний коефіцієнт опору матеріала тензорезистора [24].

Виразивши за допомогою рівняння (2.27) ε_1 і ε_2 з (4.30) і (4.31) через коефіцієнт тензочутливості S і відносний опір, для загальної зміни опору тензорезистора при зміні температури на ΔT можна з урахуванням виразу (4.32) записати:

$$\frac{\Delta R}{R} = [(\alpha_2 - \alpha_1)S + \gamma]\Delta T$$

Якщо температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу тензорезистора і об'єкта не рівні між собою, це викликає виникнення фіктивної деформації $\varepsilon_{\phi} = (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T$, яка еквівалентна деякій деформації, викликаній зовнішніми навантаженнями. Фіктивна деформація перетворюється на вихідний сигнал, який пропорційний зміні опору тензорезистора. У цьому випадку практично неможливо відрізнити сигнали, викликані фіктивною та дійсною деформацією.

Для виключення при вимірюваннях похибки, обумовленої зміною температури, використовуються два методи компенсації. Перший ґрунтується на застосуванні для вимірювання деформації **самотермо-компенсованих тензорезисторів**, а другий є методом **схемної компенсації**.

Застосовуються самотермокомпенсовані тензорезистори двох типів: одинарний константовий, термочутливість якого повинна бути такою ж, як і у досліджуваного матеріалу, і комбінований, чутливий елемент якого виконаний з двох послідовно з'єднаних дротів з різними знаками температурного коефіцієнта опору [24]. Одинарні тензорезистори не набули поширення, а комбіновані випускаються промисловістю для сталі, алюмінію та міді. Це фольгові тензорезистори типу ФКТК (фольгові константові термокомпенсовані).

Чутливий елемент комбінованих тензорезисторів складається з двох частин: одна виконується з константового дроту, а інша - з мідного чи нікелевого. Опір цих двох частин підбирають таким чином, щоб при зміні температури загальне температурне збільшення відносного опору тензорезистора дорівнювало нулю.

Слід зазначити, що з використанням самотермокомпенсованих тензорезисторів не завжди вдається забезпечити повну термокомпенсацію. Тому ширше застосування знаходять методи схемної компенсації. Один з таких мето-

дів, так званий методом протитечії, полягає в тому, що поряд з наклеєним тензорезистором до об'єкта кріпиться термопара, яка підключається до виходу мостової схеми через реостат. Струм термоЕРС, що створюється при зміні температури в ланцюзі термопари, спрямований назустріч струму розбалансу моста, встановлюється за допомогою реостата таким, щоб повністю компенсувати цей термострум розбалансу.

Найбільш широке застосування в тензометрії отримав **метод схемної термокомпенсації**, заснований на тому, що два звичайних серійних тензорезистора, що використовуються для вимірювань, з однієї партії з однаковими характеристиками наклеюються за однаковою технологією на об'єкт, що досліджується, в достатній близькості один від одного і включаються в суміжні плечі симетричної мостової схеми. При цьому один тензорезистор, який виконує роль термокомпенсатора, наклеюється на матеріал, що не деформується (або слабо деформується) в процесі навантаження. Якщо деформування відбувається в умовах згину, що характерно для балок, то найбільш вдалий варіант наклеювання датчиків полягає в тому, щоб один з них приклеювався до волокон, які піддаються при випробуваннях розтягуванню, а другий - до тих волокон, які стискаються і знаходяться на однаковій відстані з розтягнутими волокнами від нейтральної осі. В цьому випадку обидва тензорезистори є активними і в той же час вони взаємно термокомпенсують один одного, так як при зміні температури опір суміжних плечей моста отримує однакове збільшення, що не призводить до розбалансу моста.

Компенсаційний тензорезистор можна також наклеювати на пластину, що не деформується, з того ж матеріалу, що і об'єкт дослідження. При цьому її необхідно розташовувати якомога ближче до активного тензорезистора для забезпечення ідентичності температурних умов.

Тензорезистори опору за умови якісної їх наклеювання на об'єкт дослідження, виконання ретельних тарувань та забезпечення в процесі випробувань належної термокомпенсації дозволяють проводити вимірювання з високою точністю, абсолютна похибка вимірювання деформації в цьому випадку становить до 0,0005%.

На закінчення відзначимо, що поширення тензорезисторів опору пояснюється їх великими перевагами над іншими засобами вимірювання деформацій і перетворювачами.

Недоліки тензорезисторів, як зазначалося вище, менш суттєві: вони є датчиками одноразового використання, не піддаються індивідуальному таруванню і характеризуються низьким абсолютним рівнем вихідних сигналів. Однак ці недоліки не заважають їх широкому застосуванню як найуніверсальнішого та найдоступнішого засобу вимірювань у макроексперименті.

4.3.3 Тензометричні перетворювачі механічних величин, тензометрична апаратура

Тензорезистори опору використовуються як датчики в перетворювачах механічних величин, призначених для вимірювання переміщень, сил, крутних моментів, тисків, прискорень і вібрацій. Ці перетворювачі називаються тензорезисторними. Їх чутливим елементом є пружний елемент, на який наклеюються тензорезистори. Вимірювана механічна величина впливає на пружний елемент, викликаючи його деформацію, пропорційну цій величині. При цьому тензорезистори також деформуються, змінюється їхній опір, відбувається розбаланс моста і на виході вимірювальної схеми отримуємо електричний сигнал, який посилюється та реєструється такими ж приладами, як і при прямому використанні тензорезисторів.

Досліджувані об'єкти відрізняються великою різноманітністю розмірів, конструктивних форм і умов випробувань, тому важко створити уніфіковані перетворювачі не тільки для всіх механічних величин, але і для кожної величини окремо. Їх розробка в основному зводиться до вибору та розрахунку пружних елементів, що є стрижневими, балочними або рамними нескладними конструкціями. Розміри інших деталей перетворювача вибираються з конструктивних міркувань.

Форма та розміри пружного елемента визначаються діапазоном зміни механічної величини, частотним діапазоном вимірювань, власною частотою тензорезисторного перетворювача, формою та розмірами об'єкта дослідження. Матеріал, що використовується для виготовлення пружних елементів, повинен володіти досконалою пружністю, високою міцністю, мінімальним гістерезисом, високою межею пропорційності, добре чинити опір повзучості і характеризуватися високою релаксаційною стійкістю. Таким вимогам задовольняють спеціальні пружинні та інструментальні сталі, такі, як У8 - У12, 60С2, 30ХГС, вуглецеві сталі 65 і 70, а також берилієві бронзи, мідно-цинкові латуні, вольфрамокремністі сталі та деякі інші. Для тривалої та успішної експлуатації перетворювача, що забезпечує стабільність вимірювань та достатній для посилення рівень вихідних сигналів тензорезистора, максимальне напруження в пружному елементі не повинно перевищувати 30-60% границі плинності, що для спеціальних сортів сталі становить 300 - 1000 МПа. При цьому частота зміни вимірюваної величини повинна не менше ніж на порядок відрізнятися від резонансної частоти перетворювача. Для всіх перетворювачів механічних величин найважливішою характеристикою є коефіцієнт перетворення, який виражається залежністю [46]

$$k_{\Pi} = \frac{n\varepsilon_T}{\xi}, \quad (4.33)$$

де n – число активних плеч в тензометричному мості; ξ – вимірювана механічна величина; ε_T допустима деформація пружного елемента в місці наклейки тензорезистора.

При розрахунку пружних елементів у формулу (4.33) підставляють ξ_{\max} і $\varepsilon_{T_{\max}}$. Значення ξ_{\max} визначається граничним значенням вимірюваної величини, а $\varepsilon_{T_{\max}}$ – допустимою деформацією чутливого елемента в місці наклейки тензорезистора, яка відповідає максимальним напруженням $\sigma_{\max} \leq (0,3 - 0,6)\sigma_{0,2}$ і залежить від властивостей матеріалу пружного елемента.

Якщо перетворювач призначений для вимірювань за статичного навантаження, намагаються досягти необхідної чутливості при лінійності характеристики перетворення. Для перетворювачів, призначених для вимірювань у динамічному режимі, необхідно також враховувати співвідношення частоти власних коливань пружного елемента і частоти вимушених коливань.

Тензорезисторний перетворювач механічних величин після виготовлення тарується залежно від призначення на відповідних тарувальних пристроях та устаткуванні.

Перетворювачі переміщень. Ці перетворювачі застосовуються в оцінці жорсткості елементів, вимірюванні осьових переміщень і прогинів, які можуть становити від кількох мікрометрів до сотень міліметрів. Коефіцієнт перетворення тензорезисторних перетворювачів переміщень виражається залежністю

$$k_{\text{пш.}} = \frac{n\varepsilon_T}{\delta}, \quad (4.34)$$

де δ – переміщення, що вимірюється.

Геометричні розміри, форма та чутливість пружних елементів перетворювачів переміщень дуже різноманітні. Найбільш універсальний пружний елемент у вигляді консольної балки рівного опору згину (рис. 4.24а) має високий коефіцієнт перетворення та достатню лінійність.

Використовують також пружні двоконсольні елементи. У малогабаритних перетворювачах в якості пружного елемента застосовують рамні (рис.4.24б) і розрізні кільцеві (рис. 4.24г) пружні елементи. Чутливий елемент у вигляді П-подібної рами має оптимальну по відношенню до лінійності характеристику. Для вибору оптимальних розмірів найпростіших схем пружних елементів розроблено номограми, наведені у спеціальній літературі та

довідкових посібниках [24, 46]. Вони дозволяють з урахуванням визначених із співвідношення (4.34) значень коефіцієнта перетворення підібрати розміри пружних елементів заданої конструкції та оцінити їх жорсткість залежно від діапазону вимірів.

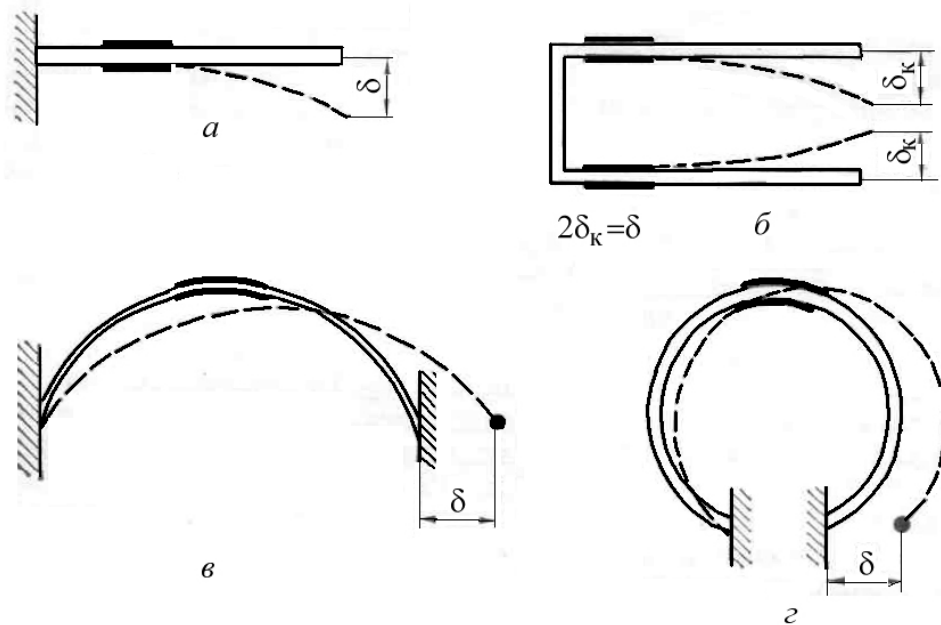


Рис. 4.24 Схеми чутливих балкового (а), рамного (б), аркового (в) та кільцевого (г) елементів перетворювачів переміщень

Геометрична форма та габаритні розміри допоміжних деталей перетворювача встановлюються після розрахунку пружного елемента на основі конструктивних, технологічних та інших міркувань.

Перетворювачі сил і крутних моментів. Сили вимірюються двома способами. Перший спосіб заснований на безпосередньому тензометруванні вузлів та елементів досліджуваного об'єкта, на які наклеюються тензорезистори. Його можна використовувати тільки в тих випадках, коли матеріал об'єкта дослідження деформується пружно при напруженнях, менших за межу пропорційності. Якщо ця умова не виконується, то можливі значні похибки, зумовлені нелінійністю залежності деформацій від напружень та діючих сил.

Другий спосіб полягає у використанні спеціальних тензорезисторних перетворювачів сили, які послідовно вводяться в силовий ланцюжок в якусь її ланку. Ці перетворювачі отримали також назву силовимірювачів або дина-

мометрів. Вони можуть бути попередньо протаровані, що сприяє зменшенню похибки вимірювань.

Коефіцієнт перетворення силовимірювачів визначається з виразу

$$k_{\text{ПС}} = \frac{n\varepsilon_{\text{T}}}{P}, \quad (4.35)$$

де P – сила, що вимірюється, Н.

Під час експериментальних досліджень виникає потреба у використанні різних за конструктивним оформленням силовимірювачів. Вироби, що випускаються промисловістю, не завжди дозволяють виконати необхідні вимірювання, тому для постановки коректного експерименту в конкретних умовах часто доводиться використовувати силовимірювачі індивідуального виробництва.

В якості чутливого елемента в тензорезисторних перетворювачах сили застосовуються жорсткі пружні елементи у вигляді:

- стрижня прямокутного, круглого або профільного перерізу (для вимірювання сил розтягу більше 5 кН),
- консольних або двоопорних балочок (для вимірювання сил розтягу від 0,2 до 5 кН);
- суцільної кулі (для вимірювання стискаючих сил більше 50 кН),
- замкнутого кільця (для вимірювання стискаючих і розтягуючих сил від 0,5 до 10 кН),
- мембран.

Кільцеві чутливі елементи силовимірювачів можуть використовуватися для вимірювання сил, більших 10 кН, але в цьому випадку необхідно враховувати нелінійність їх кривої тарування.

Для виготовлення пружних елементів застосовуються сталі з межею пластичності не менше 800 МПа, фосфоритна або берилієва бронза, латунь та інші сплави з високою межею пропорційності та розвиненою лінійною ділянкою пружного деформування

Крутні моменти вимірюються трьома способами.

Перший спосіб ґрунтується на безпосередньому тензометруванні досліджуваної деталі, на яку наклеюються тензорезистори. У процесі випробувань вимірюється деформація, пропорційна крутному моменту. Цей метод характеризується такими ж недоліками, як і розглянутий вище перший метод вимірювання сил а саме:

- достовірні результати при безпосередньому тензометруванні можна отримати тільки в тому випадку, якщо діючі на поверхні досліджуваної деталі напруження нижче границі пропорційності;

- для великогабаритних деталей і для деталей, які не можна демонтувати і встановити в тарирувальний пристрій, не можна виконати пряме тарування, що істотно знижує точність вимірювань.

Другий спосіб вимірювання крутних моментів полягає у використанні вбудованих в силовий ланцюжок спеціальних силовимірювачів, за допомогою яких вимірюється передана ними окружна сила. За значенням цієї сили з урахуванням радіусу валу розраховується значення крутного моменту.

Третій спосіб базується на застосуванні тензорезисторних перетворювачів крутного моменту, які вбудовуються в силовий ланцюжок. Пружний елемент такого перетворювача, як правило, виконується у вигляді стрижня або циліндра, що працює на кручення і послідовно (співвісно) приєднаний до валу.

Вбудований силовимірювач і перетворювач крутного моменту можуть бути протаровані, і тому їх чутливість встановлюється відповідною моменту, що вимірюється. Коефіцієнт перетворення у цьому разі визначається залежністю

$$k_{\text{п.м.}} = \frac{n\varepsilon_{\text{T}}}{M_{\text{к}}}, \quad (4.36)$$

де $M_{\text{к}}$ – крутний момент, Н·м.

Тензорезисторні перетворювачі тиску рідин та газів. Необхідність вимірювання тиску виникає при дослідженні вузлів машин із гідравлічним або пневматичним приводом; двигунів внутрішнього згорання; газопроводів, водоводів, паропроводів, які працюють під високим тиском; різних резервуарів для зберігання та транспортування рідин та газів; котлотурбінного обладнання електростанцій тощо.

Реалізований діапазон вимірюваних тисків надзвичайно широкий – від нуля до кількох тисяч мегапаскаль, і так само широкий їх частотний діапазон – від нуля до кількох десятків кілогерц.

Для вимірювання тисків, як і сили, при випробуваннях використовуються два способи:

- 1) безпосереднє тензометрування поверхні конструктивного досліджуваного елемента;
- 2) тензометрування із застосуванням тензорезисторних перетворювачів тиску.

Безпосереднє вимірювання тисків за допомогою наклеєних на досліджувану поверхню тензорезисторів не завжди забезпечує необхідну точність і чутливість вимірювань через неможливість проведення попереднього прямо-

го тарування досліджуваного елемента. Перевага цього способу полягає лише в тому, що при його використанні не потрібно роз'єднання гідро- та пневмо- систем та установки спеціальних штуцерів для підключення перетворювачів тиску.

Вимірювання тиску другим способом набуло більш широкого поширення. Коефіцієнт перетворення тензорезисторних перетворювачів тиску визначається з виразу

$$k_{п.т.} = \frac{n\varepsilon_T}{p}, \quad (4.37)$$

де p – тиск, що вимірюється, Па.

В якості чутливих елементів (рис. 4.25) в перетворювачах тиску використовуються мембрани 1 з жорстким защемленням по контуру (рис. 4.25а); мембрани з проміжним перетворювачем переміщень 3 у вигляді консольної балочки, переміщення якій надається за допомогою штовхача 2 ; штуцера-заглушки (рис. 4.25б); сифони 1 з проміжним перетворювачем 2 у вигляді консольної балочки (рис. 4.25в).

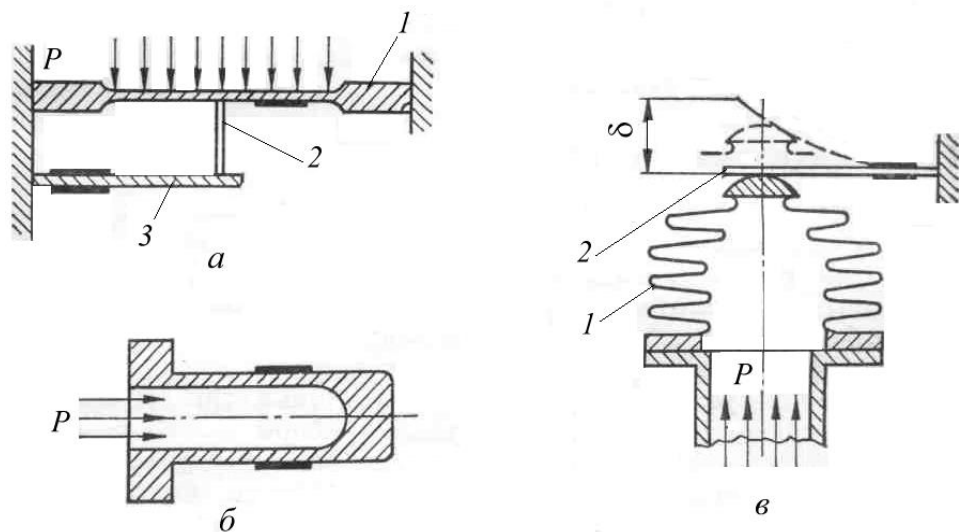


Рис. 4.25 Схеми чутливих елементів мембранного (а), штуцер-заглушки (б), сифонного (в) перетворювачів тиску

При використанні в якості чутливого елемента мембрани або штуцера-заглушки тензорезистори наклеюються безпосередньо на їх поверхню. При цьому для мембран застосовуються спеціальні мембранні фольгові тензорезистори, які зберігають працездатність у широкому інтервалі тисків і забезпечують надійну термокомпенсацію. Залежно від розмірів мембран тензоперетворювачі дозволяють вимірювати тиск від 0,001 Па до 20 МПа. Штуцери-заглушки використовуються для вимірювання практично будь-яких тисків вище 10 МПа; активний тензорезистор у цьому разі наклеюється по центру

порожнистої частини штуцера на його зовнішню поверхню перпендикулярно до твірної, а компенсаційний – у верхній суцільній частині циліндра. Застосування для чутливого елемента матеріалу з малим модулем пружності дає високі значення коефіцієнта перетворення за збереження високої частоти чутливого елемента. При використанні проміжних перетворювачів переміщення замість суцільної мембрани застосовують гофровану мембрану або сильфон, які мають велику податливість і дозволяють вимірювати дуже низький тиск при досить високій чутливості за рахунок великого переміщення кінцевого перерізу консольної балочки. Розміри чутливих елементів перетворювачів встановлюються за наведеними в довідниках [24, 46] таблицях і номограмах значеннях залежно від значення відповідних коефіцієнтів перетворення, які визначаються із співвідношень (4.33) - (4.37).

Тензометрична апаратура

Проведення тензометричних вимірювань при випробуваннях деталей машин та елементів конструкцій пов'язане з використанням електровимірювальних приладів та апаратури. Якість і достовірність отриманих результатів великою мірою залежить від правильного вибору такої апаратури.

Для живлення мостової схеми, яка є основною в тензометрії, використовується постійний і змінний струм. Незалежно від виду живлення струму вимірювальні прилади можна розділити на дві групи:

- для вимірювання за статичного деформування;
- для вимірювання за динамічного деформування.

Статичні та квазістатичні деформації найчастіше вимірюються приладами, дія яких заснована на нульовому методі та методі відхилень.

Нульовий метод забезпечує високу точність вимірювань. На рис. 4.26а [24] показана блок-схема електронного вимірювача деформацій з нуль-індикатором і включеним у ланцюг підсилювачем. У таких приладах, принцип дії яких заснований на нульовому методі, забезпечується ручне або автоматичне врівноваження моста. Ціна поділу приладу, в якому передбачено ручне врівноваження, при живленні моста постійним струмом від батареї *B* становить

10^{-6} відносних деформацій (0,0001%). Серед приладів з ручним врівноваженням моста найбільшого поширення набула блок-схема, показана на рис. 4.26б. На відміну від попередньої схеми, тут живлення моста здійснюється через трансформатор (на малюнку не показаний) від мережі або від спеціального генератора *G* змінним струмом (синусоїдальним або у формі прямокутних імпульсів). Прецизійні прилади ЕІ-1, ІСД-3, виконані за такою схемою, мають ціну поділу $2 \cdot 10^{-7}$ відносних деформацій (0,00002%).

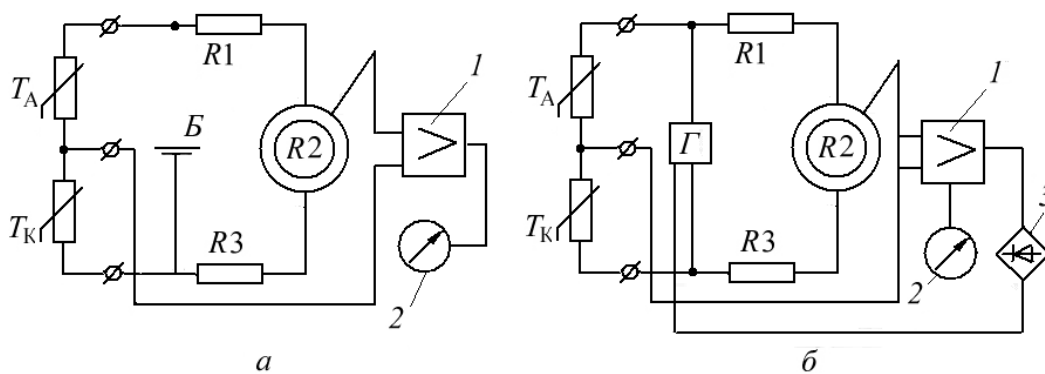


Рис. 4.26 Блок-схема приладів для вимірювання деформацій за статичного навантаження з нуль-індикатором та підсилювачем постійного струму (а), з нуль-індикатором та підсилювачем на несівній частоті (б)

На наведених схемах міст зібраний з активного датчика T_A компенсаційного датчика T_K і двох опорів $R1$ і $R3$. При деформуванні об'єкта, на який наклеєні тензорезистори, з'являється сигнал розбалансу, що надходить з виходу мостової схеми на підсилювач I і нуль-індикатор 2 (при живленні приладу змінним струмом у схему включений випрямляч 3), який реєструє струм розбалансу. Для компенсації сигналу розбалансу використовується реохорд $R2$ за допомогою якого вручну проводиться балансування моста.

Для автоматизації вимірювань використовуються прилади з автоматичним урівноваженням моста типу АР-2, КСТ-4 та АІ-1. Сигнал розбалансу після виходу з мостової схеми в таких приладах подається на підсилювач і далі на виконавчий реверсивний електродвигун, який переміщує пристрій балансу (реохорд) в сторону компенсації цього сигналу. Електродвигун зупиняється, якщо міст збалансований, тому що в цьому випадку напруга живлення падає до нуля. Одночасно за допомогою виконавчого електродвигуна переміщується реєструючий пристрій приладу, що дозволяє в момент зупинки двигуна зробити відлік за шкалою і отримати запис діаграми.

В даний час для вимірювання статичних деформацій набули поширення прилади, виконані за схемами автокомпенсаторів з дискретним врівноваженням і які мають виходи на цифрові пристрої. Вони відрізняються швидкістю та дозволяють реєструвати дані вимірювань у кодовому вигляді.

При вимірюванні деформацій, близьких до 10% характеристика мостової схеми стає нелінійною. Для усунення нелінійності в приладі АМ-2 використовується модифікована схема моста, що дозволяє вимірювати деформації від 1 до 10 %.

Для отримання результатів вимірювань у вигляді епюр використовуються спеціальні епюрографи та епюрні установки.

Якщо для вимірювань використовуються розетки тензорезисторів, то діючі на поверхні об'єкта напруження визначаються за допомогою приладів ІСН-20 а ЕМУГ-1, які дозволяють за рівняннями зв'язку деформація–напруження для плоского напруженого стану отримувати безпосередньо значення напружень.

Для вимірювання статичних деформацій у великій кількості точок застосовуються прилади ІСД-3 та цифровий тензометричний міст ЦТМ-3. Вимірювач статичних деформацій ІСД-3, виконаний за мостовою схемою з нульовим методом вимірювання, дозволяє обробляти інформацію, що надходить від послідовно підключених до вимірювального ланцюга 20 тензорезисторів опором від 50 до 550 Ом. Живлення приладу постійним струмом здійснюється від батареї типу КБС-0,5 напругою 4,5 В. Відлік показань проводиться зі шкали реохорда при нульовому положенні стрілки мікроамперметра, при цьому діапазон відносних деформацій, що вимірюються, становить 0,001 - 1%.

Цифровий тензометричний міст ЦТМ-3, принцип дії якого заснований на реалізації методу відхилень, призначений для вимірювання деформації в 100 точках за допомогою тензорезисторів опору від 50 до 400 Ом. Послідовне підключення тензорезисторів до пристрою здійснюється перемикачем датчиків ПД-100М, що забезпечує швидкодію реєстрації не більше 1,4 с. Залежно від умов проведення вимірювань у приладі передбачено дистанційне, ручне та автоматичне керування перемикачем. Результати вимірювань реєструються на цифровому пристрої. Прилад дозволяє вимірювати відносну деформацію в межах 0,001 – 1%.

Для тензометрування складних об'єктів з великою кількістю точок, що досягає кількох десятків тисяч, розроблені спеціальні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), призначені для збору, автоматичної обробки та подання результатів випробувань безпосередньо в процесі експерименту.

4.4 Автоматизація керування випробувальним обладнанням

4.4.1 Автоматизація вимірювань

В автоматизованих вимірювальних системах вихідна інформація передається до блоків обробки та реєстрації у вигляді електричних сигналів, які виробляються перетворювачами фізичних величин. У системах для вимірювання деформацій і напружень в якості таких перетворювачів в основному вико-

ристовуються перетворювачі опору, ємнісні, індуктивні та п'єзоелектричні. Найбільше поширення як первинних датчиків-перетворювачів отримали тензорезистори, зміна опору яких у процесі спільного з об'єктом дослідження деформування викликає зміну напруги на виході потенціометричної або мостової схеми.

Електричний сигнал при проходженні ланцюга вимірювання може бути посилений, перетворений і приведений до вигляду, зручному для введення в блоки обробки результатів випробувань або в блоки вироблення команд управління в установках із замкнутим контуром регулювання. У загальному випадку електричний сигнал, що формується датчиками в процесі деформування, є безперервним і поступає в ланцюг вимірювання в аналоговій формі. У такій же аналоговій формі відбувається його посилення, детектування і фільтрація, після чого він у традиційних системах вимірювання подається на реєструючий прилад для запису у вигляді кривої, характер зміни якої визначається законом деформування поверхні об'єкта.

У сучасних автоматизованих системах, що базуються на використанні комп'ютерів, передача та обробка інформації на частини вимірювального тракту здійснюються у вигляді дискретного набору комбінацій електричних сигналів. У цьому випадку у вимірювальному ланцюзі необхідно встановлювати прилад, який перетворював би безперервну зміну електричної напруги на дискретний набір сигналів-аналоگو-цифровий перетворювач (АЦП). Він розташований у вимірювальному ланцюзі після підсилювача. Сигнали в дискретній формі через пристрій сполучення (інтерфейс або адаптер) подаються в систему обробки, основним елементом якої є ПК, що об'єднує центральний процесор, оперативну пам'ять та систему математичного забезпечення [26]. Крім центрального процесора в системі можуть також використовуватися допоміжні процесори для попередньої обробки даних, а крім оперативної пам'яті - зовнішні запам'ятовуючі пристрої, в яких зберігаються результати, та бази даних.

У системі обробки даних також є пристрої вводу-виводу та спілкування з експериментатором через монітори для зручності сприйняття ним результатів випробувань, а також пристрої виведення даних у систему індикації, яка може включати мнемосхеми, графобудівники різного типу та пристрої цифрового друку (АЦПУ).

Для управління системами силованавантаження (або нагріву) установок із замкнутим контуром регулювання цифрова інформація перетворюється на аналогову за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП).

Форма та способи подання інформації на входах та виходах різних пристроїв можуть не збігатися; їх з'єднання між собою здійснюється за допомо-

гою стандартів на сполучення - інтерфейсів або за допомогою спеціальних адаптерів (перехідників).

Функціонально закінчені елементи системи, що мають однаковий інтерфейс входу-виходу, називаються модулями [26]. Автоматизовані системи для експериментального дослідження, як правило, компонуються повністю або частково з типових апаратних модулів (*керуючих, інтерфейсних та оброблюваних*). При цьому використовуються модулі різного типу: датчики сигналів, підсилювачі, вимірювачі, комутатори, інтерфейси, запам'ятовуючі пристрої, аналітичні модулі, призначені для обробки результатів, їх реєстрації та індикування.

Впровадження автоматизованих систем у практику експерименту обумовлено його ускладненням, збільшенням кількості даних на одиницю часу, збільшенням обсягу інформації, що накопичується, доступ до якої повинен бути простим і швидким, а також необхідністю управління експериментом за контрольованими параметрами, що розраховується безпосередньо в процесі його проведення.

Застосування автоматизованих вимірювальних систем дозволяє усунути характерне для більшості видів випробувань протиріччя між малою тривалістю експерименту і великими витратами на обробку його результатів при використанні традиційних методів збору, реєстрації та обробки дослідних даних.

Найбільш ефективно застосування автоматизовані системи на базі ПК знаходять при проведенні вимірювань з великою кількістю точок. Такі системи називаються **інформаційно-вимірювальними системами (ІВС)**; вони орієнтовані на статичні та ресурсні випробовування складних конструкцій за наявності вимірювальних каналів до кількох тисяч і призначені для збору, обробки, аналізу та подання інформації. До них пред'являються такі вимоги [5]:

- сумісність в одній системі генераторних та параметричних датчиків з різними вихідними електричними сигналами;
- регульована багатоканальність, у тому числі за типами первинних вимірювальних перетворювачів;
- достатня швидкодія;
- робота на довгі вимірювальні лінії;
- можливість перебудови системи під різні види випробувань;
- різні види реєстрації;
- обробка вимірювальної інформації в ПК в режимах реального та розділеного часу;
- точність;

- наявність різноманітних сервісних режимів.

Розроблені системи ділять на два класи:

- системи **універсального призначення**, які забезпечують вимірювання в різних видах установок або використовуються при натурних випробуваннях конструкцій,

- системи спеціалізованого призначення, які орієнтовані на конкретні види випробувань і характеризуються специфічними функціональними можливостями.

До ІВС універсального призначення належать системи, що використовуються при дослідженні напружено-деформованого стану авіаційних конструкцій, типу *ШВБС* (швидкодіюча вимірювальна багатоканальна система) [42].

Вимірювальну інформацію отриману у процесі випробувань авіаційних конструкцій на міцність, можна поділити на дві основні групи.

До першої відноситься інформація, яка отримується від первинних перетворювачів про стан об'єкта. До цієї групи входять дані, що надходять від тензорезисторів, термопар, перетворювачів лінійних та кутових переміщень.

До другої групи належить інформація про характер зовнішніх впливів на об'єкт дослідження. Ця інформація надходить від тензорезисторних перетворювачів сили та тиску та від термопар. Обсяг інформації першої групи найбільший, оскільки під час випробувань на міцність об'єкт дослідження встановлюється до 10 000 і більше первинних перетворювачів.

Вимірювальна частина *ШВБС* побудована за модульним принципом і складається з 120 вимірювальних модулів, кожен із яких обслуговує по 100 вимірювальних каналів. При цьому 120 модулів об'єднані в 12 груп по 10 модулів у кожній (рис. 4.27).

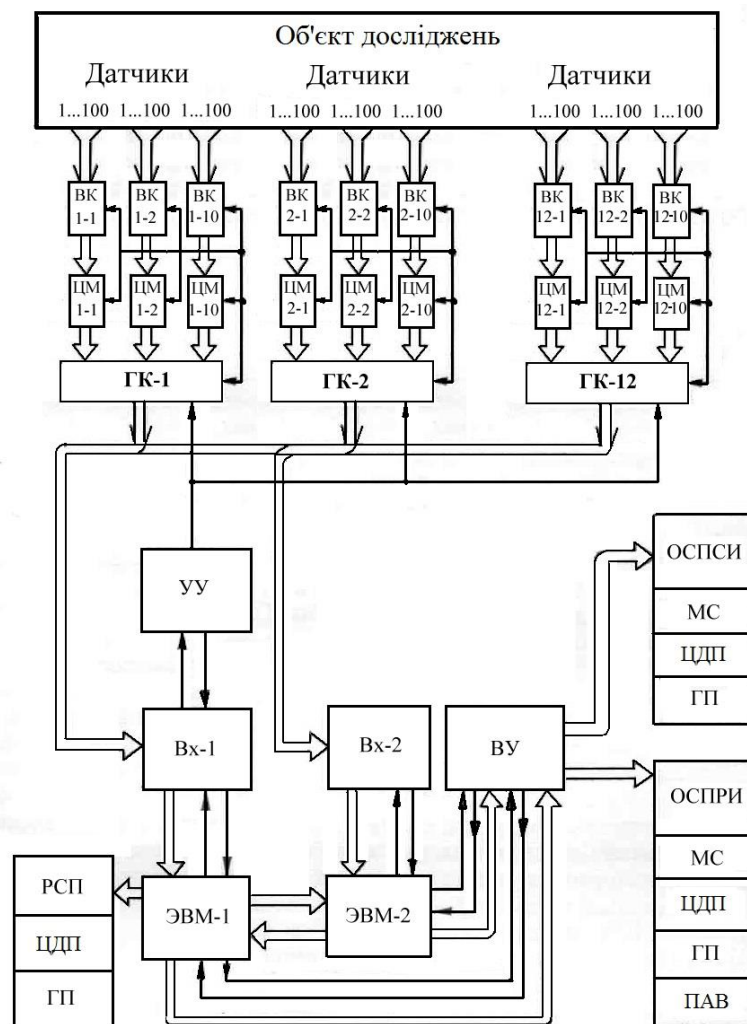


Рис. 4.27 РСП – рабочая система представления; ОСПС и ОСПР – оперативные системы представления соответственно за статических и ресурсных. ВК - входные коммутаторы; ЦМ – цифровые мосты; ГК – групповые коммутаторы; ПУ – прибор управления; Вх-1 и Вх-2 – входные приборы; ВП – выходные приборы; ЦДП – цифродрукарский прибор; ГП – графопобудовувач; МС – мнемосхема; ПАВ – прибор аварийного відключення

Информация від кожної групи модулів через груповий комутатор надходить на вхід пристрою обробки інформації і далі – на пристрій наочного подання та реєстрації.

Швидкодія ШВБС становить 6000 вимірів в 1 с. Система дозволяє вимірювати деформації у діапазоні ± 1 %.

Розглянемо принцип дії окремих блоків та пристроїв автоматизованих систем на прикладі ІВС.

Вхідні комутатори (ВК) – це перемикаючі пристрої, що забезпечують за допомогою включення, відключення та перемикання вибір необхідної схеми ланцюга [26, 42]. Автоматичний комутатор складається з трьох вузлів: власне

перемикача (контакту), виконавчого (перемикаючого) механізму та вузла управління.

У ІВС використовуються різні типи комутаторів, які за принципом дії можна розділити на контактні та безконтактні, а за способом управління – на крокові, старт-стопні, циклічні та адресні [42]. Контактні комутатори у свою чергу можна поділити на механічні та магнітні. Механічні перемикачі, керовані від реле, характеризуються низькою швидкістю комутації та малим терміном служби. Однак вони передають сигнал без спотворень. Малий опір контактів у замкнутому стані (10^{-2} Ом і менше) і великий в розімкнутому (опір ізоляції 10^{11} Ом і більше) дозволяють використовувати механічні контакти в прецизійних вимірювальних ланцюгах без калібрування в інтервалі напруг від часток мілівольт до десятків вольт.

Цифровий вимірювальний міст (ЦМ) призначений для вимірювання зміни опору тензорезисторів та терморезисторів у процесі випробувань.

Цифровий вимірювальний міст виконується за схемою автокомпенсатора і включає такі типові елементи систем вимірювання: вимірювальний і компенсаційні мости, нуль-орган з підсилювачами і схемами управління, вузол балансування моста, а також генератор імпульсів і вузол синхронізації. За допомогою моста проводиться вимірювання вихідної напруги при розбалансі моста, його посилення, перетворення електричного сигналу з аналогової в дискретну цифрову форму і передачу по команді від групового комутатора на вхідні пристрої. Таким чином, цифровий міст виконує функції моста Уїтстона з автоматичним балансуванням по нуль-методу, підсилювача сигналів та АЦП. Він може працювати в трьох режимах: машинному, одиночному і в режимі опитування одного і того ж тензорезистора.

При роботі в машинному режимі результати вимірювань, що виконуються в процесі послідовного опитування датчиків ЦМ модуля, надходять через груповий комутатор і вхідний пристрій в ПК. Одиночний (разовий) режим роботи ЦМ використовується при контрольних перевірочних випробуваннях і він принципово не відрізняється від машинного режиму.

Режим опитування одного датчика застосовується лише при налагодженні та налаштуванні моста. Конструктивно ЦМ виконаний у вигляді настільного приладу, що складається з двох окремих блоків, які електрично пов'язані між собою за допомогою кабелю. В одному блоці розташовані вимірювальний та компенсаційний мости, а також інші елементи системи вимірювання, посилення та перетворення електричних сигналів, а в другому – джерело живлення.

Вхідні та вихідні пристрої, розташовані в схемах ІВС між груповими комутаторами та ПК, а також між ПК та пристроями подання вимірювальної

інформації, призначені для узгодження сигналів на вході та виході ПК з параметрами блоків системи, що сполучаються, і в такій якості виконують функцію інтерфейсів та адаптерів.

Пристрої подання вимірювальної інформації призначені для індикації та реєстрації результатів вимірювання у зручному для оперативного та довготривалого використання вигляді. Вони поділяються на дві основні групи [42]. До першої відносяться індикаційні (оперативні) пристрої подання, за допомогою яких здійснюються короточасне зберігання та оперативне подання інформації про об'єкт дослідження. Другу групу складають реєструючі (робочі) пристрої, за допомогою яких отримана в процесі експерименту інформація фіксується на якомусь носії і які дозволяють багаторазово звертатися до цієї інформації в процесі її подальшої обробки.

Пристрої індикації представляють виведену на них інформацію у наочному вигляді. Вони поділяються на сигнальні, знакові та оглядові. В якості сигнальних пристроїв використовуються світлові і звукові сигналізатори, які дозволяють фіксувати момент досягнення вимірюваної величиною певного значення. Знакові пристрої видають інформацію про процес випробувань у числовому вигляді. При випробуваннях на міцність найчастіше використовуються монітори. Оператор за допомогою клавішного пристрою може викликати на екран будь-який параметр, що вимірюється, і оцінювати його відхилення. Оглядові індикатори дозволяють одночасно представляти великий обсяг різноманітної інформації в аналоговій і цифровій формі, оцінити загальну ситуацію, що виникає в ході експерименту в будь-який момент часу, і стежити за ходом виконання програми випробувань і відхиленнями.

В якості пристроїв реєстрації ІВС використовуються монітори, пристрої цифрового друку, елементи пам'яті. При потужних потоках інформації, що формуються у процесі ресурсних випробувань, для реєстрації інформації використовуються магнітні диски, дисководи.

Електронно-обчислювальні машини на базі персонально комп'ютера або серверів забезпечують обробку даних експерименту, їх зберігання і виведення на зовнішні пристрої реєстрації.

Процесом обміну центрального процесора із зовнішніми пристроями управляють спеціальні операційні системи. Більшість ПК, що використовуються в системах автоматизації наукових досліджень, є універсальними.

При використанні ПК в автоматизованих системах може здійснюватися кілька режимів їх роботи [26]:

- монопольний,
- мультипрограмний,
- пакетний,

- розподіленого часу,
- реального часу.

При монопольному режимі всі ресурси ЕОМ спрямовані на вирішення одного завдання. Цей режим роботи в даний час застосовується для обробки результатів конкретного експерименту і характеризуються порівняно невеликою вартістю, але водночас обмеженими можливостями.

При мультипрогравному режимі в ПК перебувають одночасно кілька завдань, які паралельно обробляються її пристроями. Число завдань, що проходять одночасну обробку, залежить від числа та типу процесорів у системі та від кількості підключених периферійних процесорів.

У пакетному режимі в ПК проводять такі види робіт, які, по-перше, не вимагають постійного контролю з боку дослідника, і, по-друге, не використовуються для оперативного управління ходом експерименту. При реалізації цього режиму результати обробки завдань можуть видаватися з запланованою досить великою затримкою.

Режим розподіленого часу призначений для одночасної роботи кількох дослідників з керуючого ПК. Цей режим, як і пакетний, під час проведення експерименту не застосовується, а знаходить основне використання на етапах налагодження програми випробувань чи аналізу результатів.

Режим реального часу реалізується в автоматизованих системах наукових досліджень найчастіше, тому що він дозволяє системі швидко реагувати на зміни під час експерименту і здійснювати швидко, протягом заданого малого інтервалу часу, обробку вхідної інформації.

4.4.2 Автоматизація керування експериментальними установками

Застосування автоматизованих установок дозволяє істотно підвищити якість отриманої експериментальної інформації, особливо при складних режимах навантаження, які реалізуються, наприклад, у процесі таких випробувань, як випробування на втому за випадкової зміни навантажень, на малоциклову втому за жорсткого навантаження, на статичну та циклічну релаксацію напружень тощо. У зв'язку зі складністю відтворення за ручного управління умов плоского напруженого стану для деяких режимів випробувань без застосування автоматизованих систем практично неможливо досліджувати вплив історії навантаження на міцність та пластичність матеріалів. Тільки керовані від ПК установки забезпечують гарантоване відтворення довільних траєкторій деформування і навантаження, отримання при таких траєкторіях граничних поверхонь міцності, встановлення відповідних критеріїв гранич-

ного стану [57] і конкретизацію функцій [58], що входять до рівнянь теорій пластичності для складних процесів навантаження.

Основним елементом у складі автоматизованого випробувального комплексу є обчислювальна система, в яку разом з ПК можуть входити периферійні процесори. До основних функцій обчислювальної системи належать такі [23]:

- управління процесом деформування при жорсткому та процесом навантаження при м'якому режимах випробувань;
- контроль функціонування окремих блоків автоматизованого комплексу та управління їх роботою;
- діагностика стану комплексу та ліквідація аварійних ситуацій;
- обробка результатів випробувань та їх подання у відповідній формі.

Власне управління процесом випробувань може реалізуватися у двох варіантах. Перший з них пов'язаний із забезпеченням стабілізованого впливу зовнішніх факторів на об'єкт дослідження та вимірювальну систему. За таких випробувань всі параметри системи підтримуються постійними. Як приклад варіанту такого управління можна розглядати управління процесом досліджень на повзучість, коли від початку навантаження зразка і до його руйнування постійними підтримуються навантаження або напруження, або процесом випробувань на релаксаційну стійкість, коли підтримується постійною початкова сумарна деформація зразка.

За другого способу управління контрольований параметр процесу повинен змінюватися за заданим законом, викликаючи зміну стану об'єкта дослідження. Такий режим управління характерний для випробувань на короткочасну міцність, малоциклову та багатоциклову втому, циклічну релаксацію та циклічну повзучість [59].

Стабілізація процесу випробувань здійснюється двома способами – за збудженням та відхиленням [26].

У першому випадку на об'єкт дослідження діє деяке збудження, воно реєструється, після чого проводиться його вимірювання за допомогою спеціального блоку, який порівнює значення збудження з еталонним значенням і виробляє сигнал управління впливом на систему для компенсації цього збудження. При використанні цього способу оперують тією ж фізичною величиною, що і збуджена величина. Це збудження діє одночасно на об'єкт регулювання та систему управління.

У другому випадку збудження, що викликає порушення нормальних умов випробувань, діє лише на об'єкт дослідження. Закріплені на об'єкті тензоперетворювачі виробляють пропорційний до зміни фізичної величини електричний сигнал, який з виходу системи вимірювання подається на блок по-

рівняння, де електрична напруга сигналу порівнюється з еталонною. В результаті такого порівняння виробляється сигнал управління, пропорційний відхиленню відповідного параметра. У процесі керуючої дії на об'єкт дослідження через виконавчі органи установки значення відхилення зменшується до нуля.

Система стабілізації збудження є більш консервативною і застосовується тільки в тих випадках, коли з будь-яких причин неможливо забезпечити стабілізацію відхилення. Для надійної стабілізації збудження необхідно звести до мінімуму всі інші впливи на систему. Крім того, необхідно точно знати функцію впливу збудження на систему та функцію впливу сигналу регулювання на об'єкт дослідження.

У системах управління можуть використовуватися аналогові та цифрові методи обробки інформації. Вибір конкретного методу залежить від ряду факторів, у тому числі від необхідної точності обробки контрольованого параметра, від необхідної швидкодії системи регулювання, від наявності відповідної апаратури. Найчастіше застосовуються гібридні системи, які складаються з аналогових і цифрових блоків. У загальному випадку швидкодія аналогових систем вище, ніж цифрових. Для автоматичної стабілізації по відхиленню використовуються аналогові стабілізатори, які характеризуються високою швидкістю, досить прості за конструкцією та надійні в роботі.

Цифрові прилади в порівнянні з аналоговими відрізняються більшою гнучкістю і забезпечують більш високу точність управління. У автономних системах цільового управління можуть використовуватися цифрові вольтметри, а управління великих установок здійснюється з допомогою ПК. Системи з аналого-цифровими та цифро-аналоговими перетворювачами працюють повільніше, ніж суто аналогові, внаслідок включення в ланцюг управління ланок прямого та зворотного перетворення електричних сигналів. Тому такі системи переважно знаходять застосування для регулювання параметрів, що змінюються з не дуже високою швидкістю.

За рівнем контролю поточних параметрів досліджуваного процесу системи управління ділять на два великі класи [26]: **безумовного та умовного управління.**

Безумовним управлінням (управління без зворотного зв'язку) називається таке, за якого стан об'єкта дослідження змінюється за заданою програмою незалежно від результатів вимірювань і ступеня відповідності поточних значень параметрів заданим.

При умовному управлінні зміна стану об'єкта дослідження безперервно контролюється у процесі випробувань і порівнюється із заданою. Якщо від-

бувається відхилення від заданого стану об'єкта, в режим навантаження вносяться корективні команди від системи управління.

У сучасних установках, що базуються на використанні ПК, використовуються комбінації умовних та безумовних управлінь. При цьому останні управляють усім процесом вимірювань, а блоки умовного управління контролюють хід процесу випробувань, забезпечують вироблення управлінських команд і реалізацію заданих умов випробувань. На рис. 4.28 - 4.30 показані можливі варіанти схем управління зі зворотним зв'язком, в яких використовуються аналогові системи обробки інформації (рис. 4.28), цифрові (рис. 4.29) та гібридні (рис. 4.30).

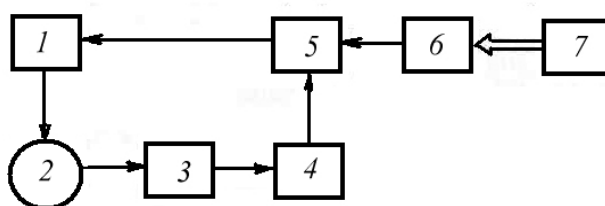


Рис. 4.28 Аналогова система управління

У суто аналогових системах контур регулювання замикається по ланцюжку: система навантаження 1 → об'єкт дослідження 2 → аналоговий датчик 3 → нормуючий підсилювач 4 → аналоговий пристрій порівняння 5 → система навантаження 1 (рис. 4.28).

Аналоговий датчик 3 є фактично перетворювачем (індуктивним, ємнісним, п'єзоелектричним, опору, терморезистивним тощо), який у процесі зміни контрольованої фізичної величини видає в ланцюг регулювання пропорційний їй безперервний електричний сигнал. Цей сигнал посилюється в нормуючому підсилювачі і надходить у пристрій порівняння, де він порівнюється з еталонним аналоговим електричним сигналом, що виробляється ПК – 7. Оскільки обчислювальна машина передає еталонний сигнал у цифровій формі, на вході пристрій порівняння розміщений цифроаналоговий перетворювач 6.

Якщо в якості перетворювача 3 (рис. 4.29 в ланцюзі регулювання використовується цифровий датчик, сигнал виробляється в цифровій формі у вигляді різних дискретних електричних імпульсів і в цьому випадку істотно спрощується структура системи управління у зв'язку з виключенням прямих і зворотних аналогових перетворювачів.

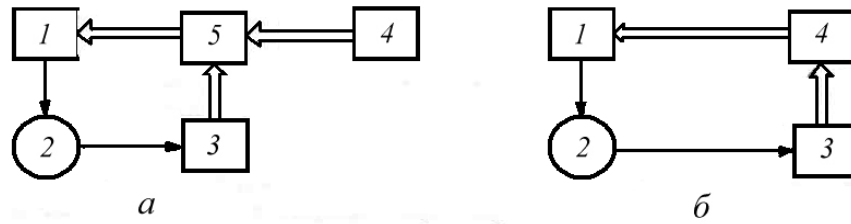


Рис. 4.29 Цифрові системи управління з цифровим пристроєм порівняння (а) і без нього (б)

Сигнали надходять від датчика 3 безпосередньо на цифровий пристрій порівняння 5, там порівнюються з виробленим ПК 4 еталонними сигналами, і сформований в пристрої 5 командний сигнал подається у виконавчий орган 1 для коригування режиму навантаження об'єкта дослідження 2 (рис. 4.29а). При цифровій формі проходження інформації по всьому ланцюгу регулювання безпосередньо в контур регулювання може бути включений мікропроцесор 4 (рис. 4.29б); у таких системах управління мікрочип виконує функції пристроїв: порівняння, вироблення еталонних сигналів та вироблення керуючих команд. Він обробляє інформаційні сигнали, формує сигнал помилки і керує випробувальною системою в цілому, тобто повністю забезпечує зворотний зв'язок об'єкта дослідження з системою силованавантаження (а при необхідності і з системою формування робочих умов).

Гібридні системи керування установок із замкнутим контуром регулювання (рис. 4.30) є найбільш громіздкими.

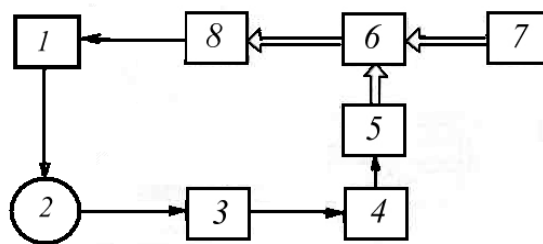


Рис. 4.30 Гібридна система управління

У ланцюг зворотного зв'язку разом з виконавчим органом 1, об'єктом дослідження 2, аналоговим датчиком 3, нормуючим підсилювачем 4 і цифровим пристроєм порівняння 6 включені два перетворювачі: аналого-цифровий 5 і цифроаналоговий 8.

ПК 7 в такій системі управління в основному використовується для задання та контролю режимів випробувань. Зв'язок обчислювальних машин з іншими пристроями та системами управління здійснюється інтерфейсами, що забезпечують їх взаємодію.

Автоматизований комплекс може будуватися за централізованою структурою, коли кожній випробувальній системі надається самостійна обчислювальна машина, або за ієрархічною структурою, при якій головна обчислювальна система здійснює координацію роботи локальних обчислювальних систем та великої кількості експериментальних установок. У випробувальних машинах, що випускаються в даний час промисловістю, використовується централізована структура і в складі таких машин обов'язковим елементом є ПК.

Схема гібридної системи управління централізованої структури, що використовується в установках фірми МТС, показана на рис. 4.31 [24].

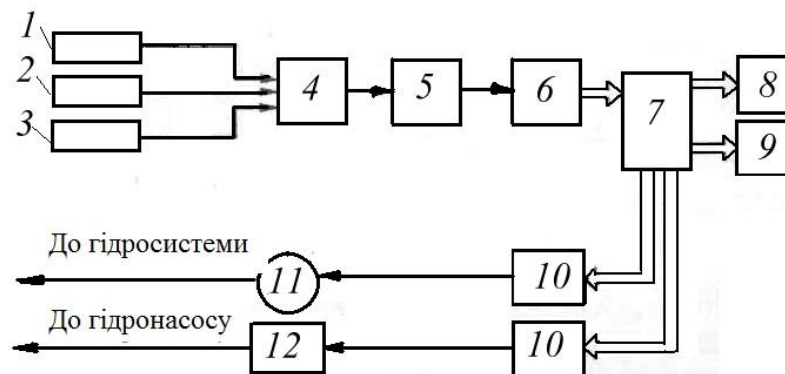


Рис. 4.31 Блок-схема установки МТС з гібридною системою управління

Установки такого типу з дросельними електрогідравлічними підсилювачами дозволяють проводити випробування за статичного і циклічного навантаження і в основному використовуються для дослідження малоциклової втоми металів, коли автоматизоване управління та обробка результатів експерименту є обов'язковими. Контрольованим параметром при випробуваннях на малоциклову втому може бути деформація, переміщення або навантаження. Сигнал від відповідного аналогового датчика 1, 2 або 3 надходить в комутатор каналів 4, далі після підсилювача 5 аналого-цифровий перетворювач 6 і в міні-ПК 7, де проводиться його обробка. З міні-ПК оброблена в цифровій формі інформація передається на пристрої запису (телетайп 8 і дисплей 9), а команда управління - на цифроаналоговий перетворювач 10, де після її перетворення в аналогову форму вона надходить в електрогідравлічний перетворювач 11, який керує подачею масла високого тиску в силовий гідроциліндр випробувальної машини. Паралельно командний сигнал через цифроаналогові перетворювачі подається на пульт 12, керуючий роботою гідронасоса. При проведенні випробувань на малоциклову втому наявність замкнутого контуру регулювання з міні-ПК дозволяє виконувати обробку результатів експе-

рименту в реальному часі і реалізувати режими м'якого і жорсткого (за розрахованим у процесі випробувань значенням циклічної пластичної деформації) навантаження в інтервалі частот приблизно від 0 до 20 Гц. Застосування ПК дозволяє здійснити практично будь-який режим циклічного навантаження не тільки з детермінованими, але й з випадковими характеристиками.

Лекція 15. Класифікація методів дослідження НДС. Рентгенографічний та поляризаційно-оптичний методи дослідження

Лекція 16. Методи дослідження з застосуванням оптично чутливих, крихких та гальванічних покриттів

Лекція 17. Метод розподільних сіток та ліній ковзання

Лекція 18. Методи дослідження полів деформацій Муара, голографічної і лазерної спекл-інтерферометрії

Лекція 19. Методи масштабного перетворення деформації поверхні за допомогою тензометрів та тензорезисторних перетворювачів, класифікація тензометрів, механічні, оптичні, струнні та пневматичні тензометри

Лекція 20. Електричні тензометри

Лекція 21. Тензорезистори опору: дротяні, фольгові, напівпровідникові

Лекція 22. Вимірвальні схеми, тарування тензорезисторів, тензометричні перетворювачі механічних величин

Лекція 23. Автоматизація вимірювань та керування експериментальними установками під час досліджень

Контрольні запитання за розділом 4

1. Класифікація тензометрів та точність вимірювання.
2. Механічні тензометри.
3. Оптичні тензометри.
4. Пневматичні тензометри.
5. Струнні тензометри.
6. Потенціометричні та електролітичні тензометри.
7. Механотронні тензометри.
8. Ємнісні тензометри.
9. Індуктивні тензометри.
10. П'єзоелектричні тензометри.

- 11.Тензорезистори, коефіцієнт тензочутливості.
- 12.Дротові тензорезистори з петлевою ґраткою.
- 13.Дротові тензорезистори з безпетлевою ґраткою.
- 14.Фольгові та напівпровідникові тензорезистори.
- 15.Клеї та наклейка тензорезисторів.
- 16.Мостова схема.
- 17.Потенціометрична схема.
- 18.Джерела та види температурної деформації.
- 19.Методи термокомпенсації за допомогою датчиків.
- 20.Схемна термокомпенсація.
- 21.Класифікація методів експериментального дослідження НДС елементів конструкцій.
- 22.Рентгенографічні методи.
- 23.Поляризаційно-оптичні та методи оптично чутливих покриттів.
- 24.Методи крихких та гальванічних покриттів.
- 25.Методи сіток, муара та ліній ковзання.
- 26.Методи голографічної інтерферометрії та спекл-інтерферометрії.
- 27.Тіньовий оптичний метод "каустик".
- 28.Методи, засновані на масштабному перетворенні деформації поверхні об'єктів дослідження.
- 29.Точність методів вимірювання ПДВ, особливості та сфери використання.
- 30.Вимоги до сучасних експериментальних комплексів із замкнутим контуром регулювання.
- 31.Блок-схема експериментального комплексу із замкнутим контуром регулювання.
- 32.Системи навантаження; їх призначення та принципи побудови.
- 33.Системи вимірювання, обробки результатів та індикації.
- 34.Електронні системи вироблення команд управління.
- 35.Автоматизація вимірювань та управління експериментальними комплексами.
- 36.Інформаційно-вимірювальні системи; їх структура та комплектація.
- 37.Аналогові системи управління та його структура.
- 38.Сучасні цифрові системи управління, їх переваги та недоліки.
- 39.Гібридні системи управління сучасних випробувальних машин, що випускаються промисловістю розвинених країн.

5 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ І ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ СЕРЕДОВИЩ І ТЕМПЕРАТУР

5.1 Дослідження впливу середовищ (нейтральних і агресивних) на міцність і довговічність

Для відтворення в зоні об'єктів дослідження умов, близьких за впливом до навколишнього середовища та реальних умов експлуатації під час випробувань використовують:

- рідкі і газоподібні середовища різного ступеня агресивності;
- низькі і високі температури;
- вакуум та підвищені тиски.

В якості **рідких агресивних середовищ** при механічних випробуваннях використовуються морська вода, розчини кислот, солей і лугів різної концентрації, розплави деяких легкоплавких металів.

До **агресивних газоподібних середовищ**, що використовуються при випробуваннях, можна віднести атмосферний і сольовий туман. Також дуже поширені випробування металів в атмосфері деяких чистих газів (наприклад, водню), які при взаємодії з поверхнею металу викликають зміну його властивостей.

В якості агресивного середовища в певних умовах може розглядатися і звичайне повітря, що викликає при підвищених температурах інтенсивне окислення таких металів, у яких плівка оксидів, що утворюється, не захищає основу від подальшого окислення. Дуже низькою стійкістю до окислення характеризуються тугоплавкі метали великої четвірки - вольфрам, молібден, ніобій, тантал і сплави на їх основі. При температурах від 800 К і вище їх оксиди або випаровуються, як у легкоплавкого триоксиду молібдену, або розтріскуються і відшаровуються від неушкодженого металу, як у ніобію, що сприяє прискоренню процесу окислення. Для того щоб забезпечити захист тугоплавких сплавів від взаємодії з окисними та іншими агресивними середовищами, їх випробовування проводять у **вакуумі або в атмосфері дуже чистих нейтральних газів**, найчастіше аргону або гелію.

Аргон і гелій використовуються для створення захисного нейтрального середовища і при випробуваннях інших матеріалів, на які кисень повітря чинить пошкоджувальну дію внаслідок окислення.

Корозійний вплив агресивних середовищ в основному проявляється при їх тривалому контакті з металами, тому методи випробувань в агресивних

середовищах отримали свій розвиток у випробуваннях на втому і тривалу міцність.

При використанні в якості агресивного середовища рідини її взаємодія з поверхнею об'єкта, що досліджується, забезпечується трьома способами:

- змочуванням,
- розбризкуванням,
- зануренням.

Перший спосіб застосовується у тих випадках, коли рідина утворює з основним металом амальгами. Вона наноситься на метал пензликом або при одноразовому зануренні зразка у відповідний розчин.

Другий спосіб знаходить застосування, якщо корозійний розчин необхідно подавати в локальну зону об'єкта дослідження.

При дослідженні впливу агресивної рідини на розвиток втомної тріщини, розчин надходить з розташованого над елементом з тріщиною резервуара в крапельницю. Краплі, падаючи з деякої висоти, при ударі по поверхні деталі розбризкуються і заповнюють вістря тріщини.

Третій спосіб є найбільш поширеним, за нього досліджуваний зразок або деталь розміщуються в ємності з рідиною. Конструкція пристроїв, призначених для таких випробувань, залежить від властивостей агресивної рідини, характеру навантаження та тривалості експерименту. Якщо в процесі навантаження зразка розчин не витрачається, то допускається його одноразова заливка в робочу ємність тільки на початку випробувань. В інших випадках необхідно забезпечувати постійне підведення агресивного середовища до поверхні зразка, її перемішування та поступову заміну.

Найпростіша конструкція пристосування для дослідження тривалої міцності металів в розчині, що омиває зразок, показана на рис. 5.1 [23].

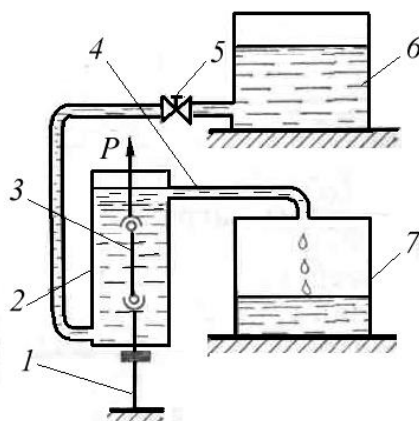


Рис. 5.1. Система безперервної подачі рідкого агресивного середовища до зразка за випробувань на тривалу міцність

Ємність – посудина 2 щільно закріплена на нерухомому захваті 1 зі зразком 3. Рідина з ємності 6 завдяки різниці встановлених рівнів самотоком

надходить у посудину 2 і далі через патрубок 4 потрапляє в резервуар 7. Швидкість потоку регулюється клапаном 5. Така конструкція пристрою може бути використана і для випробувань на втому в умовах розтягу-стиску при вертикальному розташуванні силового ланцюжка машини.

Для випробувань на корозійну втому в умовах згину доцільно використовувати машини з механічними збудниками коливань зворотнього типу, які також характеризуються вертикальним розташуванням захватів і зразка та нерухомістю нижнього захвату. У загальному випадку при проведенні корозійних випробувань механізм силозбудження машин рекомендується розташовувати над ємністю з розчином, при цьому зона випробувань повинна бути добре герметизована для запобігання виплескування або протікання робочої рідини, яка може викликати інтенсивну корозію деталей випробувальної машини і вихід її із ладу. Рекомендується також усі деталі вузла навантаження, які в процесі випробувань контактують з агресивним середовищем, після завершення експерименту ретельно промивати водою та просушувати.

При дослідженні впливу рідких робочих середовищ на властивості матеріалів в умовах підвищених температур і тисків застосовуються спеціальні автоклави, які є посудинами високого тиску.

Дослідження впливу вакууму і газових середовищ на властивості матеріалів проводиться з використанням герметичних вакуумних камер, в яких розміщуються випробувальні зразки. При цьому для забезпечення високого вакууму та необхідної чистоти інертних газів із робочих камер мають бути виключені всі елементи, які можуть стати джерелом забруднення робочого середовища.

5.2 Експериментальні методи дослідження при високих (до 3000К) і низьких (від 1,5К) температурах

5.2.1 Методи нагріву за високих температур

Області освоєних у макроексперименті температур відповідає верхня межа, яка складає 3500 К [34]. Для випробовування зразків і елементів конструкцій у такому широкому діапазоні високих температур використовуються такі методи нагрівання:

- в електричних печах опору;
- у відзеркалювальних печах;
- індукційний;
- електронно-променевої;

- електроконтактний (або нагрівання прямим пропусканням електричного струму через зразок);
- плазмовий.

Кожен із цих методів застосовується у певному температурному діапазоні і характеризується специфічними особливостями, що обмежують працездатність методу лише для окремих видів випробувань.

Електричні печі опору. Нагрів в електричних печах опору відрізняється найбільшою універсальністю. Вони є надійними, довговічними і простими в обслуговуванні пристроями з високими метрологічними показниками, які забезпечують проведення випробувань практично від кімнатних температур до 2800К.

До основних характеристик нагрівальних пристроїв можна віднести споживану потужність, інерційність, здатність забезпечувати рівномірне температурне поле в зоні об'єкта дослідження та необхідні швидкості нагрівання.

Недоліки: електричні печі опору в порівнянні з іншими нагрівальними пристроями споживають велику потужність, відрізняються високою інерційністю і тому не дозволяють проводити випробування в неізотермічних режимах, коли необхідно забезпечувати високу швидкість нагрівання та охолодження. **Переваги:** вони є високоефективним засобом нагріву при випробуваннях в умовах постійних температур, оскільки дозволяють отримувати стаціонарне температурне поле будь-якого ступеня однорідності при короткочасних та тривалих експериментах.

Електричні печі опору застосовуються для нагрівання зразків і деталей при випробуваннях на короткочасну і тривалу міцність, повзучість, релаксацію напружень і втому в ізотермічному режимі. Їх основними елементами є стрижневі, пластинчасті або спіральні нагрівачі, що виготовляються із струмопровідних матеріалів з високим питомим електричним опором. Нагрівачі набираються в пакети або секції, за допомогою яких формується зона нагріву необхідного діаметра та довжини. Електричний струм підводиться до нагрівачів мідними струмопроводами великого перерізу. При проходженні струму великої сили в нагрівачі відбувається виділення джоулевого тепла і розігрів. У термокамерах, що працюють при температурі до 700К, як правило, використовуються трубчасті електронагрівачі (ТЕНи), що випускаються промисловістю, які відрізняються зручністю монтажу, компактністю і закритим виконанням нагрівальних елементів. Вони дозволяють отримувати температуру до 1000К. Для отримання більш високих температур застосовують відкриті нагрівачі із жаростійких тугоплавких сплавів та композиційних матеріалів. Використовуються нагрівачі з таких матеріалів:

- карбід кремнію (до 1700К);
- силіцид молібдену (до 1900К);
- хроміт лантану (до 2100К);
- діоксид цирконію (до 2300К).

Найбільш високі температури отримують за допомогою нагрівачів, виконаних з:

- ніобію (до 2350К);
- молібдену (до 2000К у вакуумі і до 2450К у захисній атмосфері);
- вольфраму (до 3250К).

Нагрівачі з тугоплавких сплавів застосовуються у вакуумних електричних печах і в печах з інертним газом, так як ці сплави схильні до окислення при температурах вище 800 К.

Електричний струм промислової частоти підводиться до нагрівача за допомогою системи нагріву, принципова схема якої показана на рис. 5.2а.

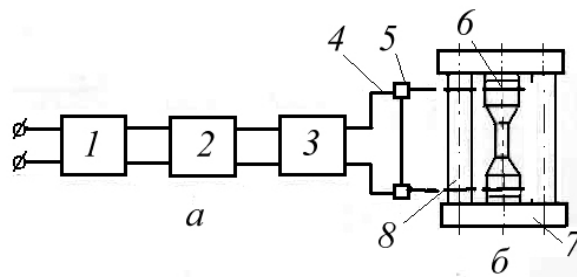


Рис. 5.2 Схема системи нагрівання електричних печей опору (а) та схема закріплення зразка при електроконтактному нагріванні (б)

Від мережі електричний струм надходить у стабілізатор напруги 1, потім на регулятор напруги 2 і силовий понижувальний трансформатор 3, від якого по гнучким мідним шинам 4 він подається до нагрівального елемента 5. На виході з системи нагріву напруга живлення становить 6-12В, а сила струму може досягати 2000 А і більше. Режимом нагрівання можна керувати за замкненою схемою за допомогою позиційних регуляторів або регуляторів безперервної дії, сигнал зворотного зв'язку надходить від закріпленого на зразку або нагрівачі датчика температури. В електропечах опору, що використовуються при випробуваннях на тривалу міцність та повзучість, позиційне регулювання температури зразка виконується за допомогою механічного дилатометричного датчика. Цей метод нагрівання придатний для дослідження електропровідних матеріалів та діелектриків.

Нагрів у відзеркалювальних печах використовується для проведення неізотермічних випробувань у тих випадках, коли потрібно забезпечити програмну зміну температури зі швидкостями 5-20 К/с при максимальному

рівні температур до 1750 К. До його переваг належить низька інерційність. Крім того, цей метод забезпечує чистоту експерименту, оскільки за своєю природою він виключає можливість виникнення електромагнітних полів у зоні зразка.

Принцип дії відзеркалювальної печі (рис. 5.3) заснований на концентрації енергії випромінювання джерела нагріву в області розташування зразка.

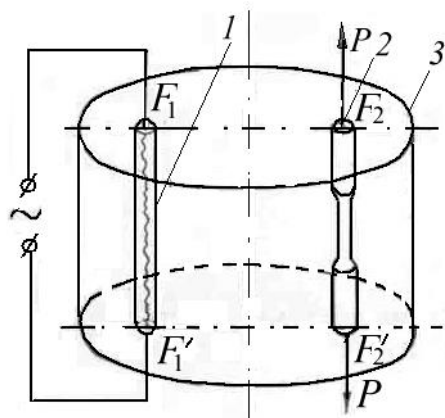


Рис. 5.3 Схема відзеркалювальної еліптичної печі

Піч представляє собою еліптичний циліндр 3 з внутрішньою полірованою поверхнею, яка характеризується високою відбивною здатністю віддзеркалення променів. В одному фокусі еліпса F_1F_1' розміщено джерело променистої енергії 1, а в іншому F_2F_2' - зразок 2. В якості випромінювача використовуються кварцеві галогенні лампи невеликого поперечного перерізу, які є тонкостінним кварцевим циліндром - колбою, всередині якої співвісно розташована вольфрамова нитка розжарювання. Колба лампи заповнена інертним газом з добавкою невеликої кількості галогенної речовини для забезпечення стабільності світлового потоку протягом тривалої експлуатації. Промисловістю випускаються лампи, розраховані на живлення електричним струмом промислової частоти напругою 220В. Їх довжина становить від 132 до 680 мм, а діаметр колби – від 8 до 27 мм.

Внутрішня поверхня еліптичного відбивного циліндра, називається концентратором. Матеріал концентратора повинен володіти високим коефіцієнтом відбиття, достатньою механічною міцністю і термічною стійкістю, стійкістю до дії окислювачів і корозії, а також узгодженістю спектральної характеристики відбиття зі спектральною характеристикою випромінювача [23]. Цим вимогам задовольняють такі метали, як золото, срібло, алюміній, мідь та їх сплави. Однак практичне застосування для виготовлення відбивачів знаходять в основному мідь та латунь, на поверхню яких наноситься прозорий шар для забезпечення стабільності коефіцієнта відбиття. У процесі

випробувань випромінювана кварцевою лампою промениста енергія фокусується на зразку, внаслідок чого відбувається його нагрівання. Основною проблемою, яку необхідно вирішувати різними способами при використанні таких печей, є проблема забезпечення рівномірного температурного поля у зразку. Підвищення рівномірності розподілу температури за товщиною зразка можна вирішити трьома способами.

Перший спосіб заснований на зменшенні ексцентриситету, що не доцільно з конструктивної точки зору; **другий спосіб** передбачає збільшення кількості концентраторів та застосування трьох- або чотирьохпелюсткових печей з відповідним числом випромінювачів. **Третій спосіб**, що найбільш просто реалізується, заснований на застосуванні обертання з невеликою кутовою швидкістю зразка, привід якого здійснюється від електродвигуна з варіатором. Останній спосіб може бути використаний переважно при випробуваннях на термостійкість або втому, тобто за таких видів випробувань, у процесі яких до зразка не прикладається зовнішня сила.

Індукційний нагрів відноситься до методів з внутрішнім виділенням тепла у зразку. Він заснований на використанні трансформаторного принципу передачі енергії від високочастотного генератора до об'єкта дослідження і тому характеризується дуже низькою інерційністю, дозволяє отримувати високі швидкості нагріву і досягати практично будь-яких температур, аж до температури плавлення досліджуваного матеріалу.

Завдяки таким особливостям індукційне нагрівання знаходить широке застосування при неізотермічних випробуваннях на втому зразків і різних деталей, що піддаються в процесі експлуатації впливу теплових потоків, що змінюються з великою швидкістю.

Принципова схема високочастотного генератора ВЧГ-1/60/0,067, що випускається промисловістю, наведена на рис. 5.4.

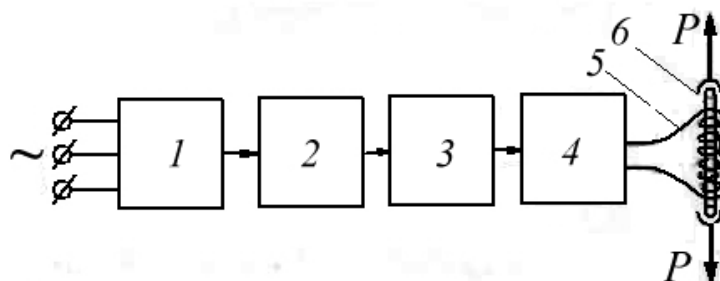


Рис. 5.4 Принципова схема високочастотного генератора

Трифазний електричний струм напругою 380 В подається від мережі на вхід високовольтного трансформатора 1, де він перетворюється в струм напругою 6300 В. У тиратронному випрямлячі 2 змінний струм перетворюється

ся в постійній напругою 10000 В і подається на вхід радіотехнічного генератора 3, на виході якого отримуємо змінний струм частотою 67 кГц і напругою 10000 В. Далі відбувається чергове перетворення електричного струму у високочастотному трансформаторі 4 до напруги 500В при збереженні частоти 67 кГц. Цей струм є робочим, він подається на індуктор 5, який слугує первинною обмоткою вихідного трансформатора, а в якості його вторинної обмотки і навантаження використовується зразок 6, на поверхні якого наводяться вихрові струми, що викликають розігрів матеріалу. Індуктор представляє собою виконану з мідної трубки спіральну циліндричну або плоску котушку, поперечний переріз якої відповідає формі поперечного перерізу досліджуваного зразка. Для охолодження індуктора по внутрішній порожнині трубки пропускається вода. Глибина проникнення струму в зразок залежить від його частоти f , питомого електричного опору ρ , магнітної проникності μ матеріалу зразка і визначається за формулою:

$$\Delta_{\rho} = 5,03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (5.1)$$

В результаті поверхневого ефекту наведені у зразку вихрові струми досягають максимального значення на його поверхні і зменшуються від країв зразка до його середини за експоненціальним законом, викликаючи нерівномірний розподіл температури за довжиною зразка та за його перерізом. Так як фізичними характеристиками матеріалу μ і ρ керувати не можна, глибина проникнення струму в зразок і глибина зони активного розігріву матеріалу, як випливає із співвідношення (5.1), в основному визначаються частотою f .

Практичне застосування індукційного методу базується на двох способах нагрівання зразків: прямому та непрямому.

У першому випадку, як було розглянуто вище, нагрівається безпосередньо зразок. Цей спосіб дозволяє створювати нагрів до дуже високих температур з високою швидкістю. При використанні **другого способу** зразок розміщується всередині тонкостінного циліндра, який виконує роль нагрівача по відношенню до зразка і є вторинною обмоткою вихідного трансформатора. Вихрові струми наводяться у циліндрі і тому електромагнітне поле на зразок не діє. Система нагріву з проміжним циліндром є більш інерційною і має обмеження швидкості нагріву і за рівнем реалізованих температур.

Гнучке управління розподілом температури по довжині зразка при прямому способі нагрівання досягається за рахунок зміни кроку витків індуктора та їх відстані від зразка.

До **недоліків індукційного методу** слід віднести: громіздкість і складність високовольтного обладнання, підвищеної небезпеки і необхідність дотримання при проведенні випробувань та під час профілактичних робіт з обладнанням дуже жорстких вимог техніки безпеки.

Електронно-променевий нагрів. Цей метод нагрівання застосовується лише при випробуваннях у вакуумі. Нагрівання зразка здійснюється за рахунок бомбардування поверхні пучком електронів, розігнаних в електростатичному полі до високих швидкостей. Метод електронно-променевого нагріву дозволяє отримувати високі температури (до 3300К) при високих швидкостях нагріву і охолодження і характеризується досить гнучким управлінням тепловим режимом.

Для генерування електронів використовується електронна гармата (рис. 5.5), яка складається з електростатичної системи, що включає катод 1, фокусуєчий електрод 2 і анод 3, і магнітної системи, що складається з фокусної котушки 4 і котушок відхилення 5.

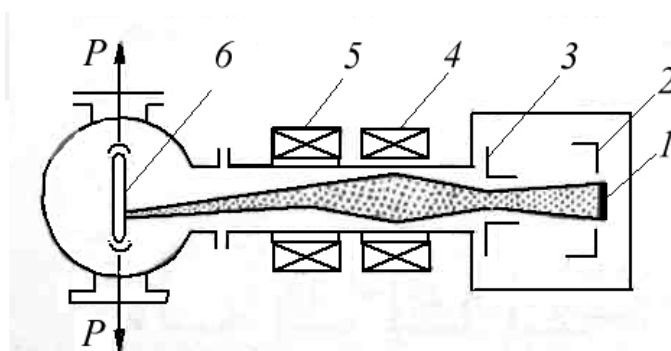


Рис. 5.5. Схема системи електронно-променевого нагріву

Електростатична система призначена для випромінювання електронів, а магнітна - для формування пучка і його переміщення у двох взаємно перпендикулярних напрямках, У поперечному напрямку здійснюється центрування пучка на зразку 6, а в поздовжньому - його розгортка вздовж зразка. Рівномірний розподіл температури за довжиною зразка забезпечується завдяки затримці в процесі розгорнення пучка на кінцях зразка для компенсації теплових втрат через механічні захвати. Для більш рівномірного прогрівання по периметру зразка застосовуються два випромінювачі, розташовані з протилежних сторін вакуумної камери.

Цей метод має такі ж недоліки, як і метод індукційного нагрівання.

Електроконтактний нагрів застосовується для випробувань зразків з електропровідних матеріалів на термостійкість або термовтому. Принцип нагрівання в цьому випадку заснований на виділенні тепла безпосередньо в зразку при пропусканні електричного струму. Цей метод відрізняється нео-

бмеженою верхньою температурною межею, широким діапазоном швидкостей нагріву (до 200 K/c), простотою схеми нагріву та гнучкістю системи управління, що дозволяє отримувати цикли зміни температури практично будь-якої форми. Для нагріву зразків використовується схема, аналогічна наведеній на рис. 5.2а, тільки електричний струм по гнучким шинам 4 підводиться не до нагрівача 5, а до зразка 6, який нерухомо закріплений між масивними плитами 7, стягнутими жорсткими колонками 8 (див. рис. 5.2б) .

При пропусканні струму і нагріванні зразка (зразок ізольований від жорсткої рами) його видовженню перешкоджають плити і тому в зразку виникають напруження стиску. У напівциклі охолодження в ньому можуть виникати напруження розтягу, якщо в напівциклі нагріву відбулося пластичне деформування матеріалу.

Таким чином, за рахунок нагрівання та охолодження з використанням порівняно нескладного обладнання здійснюються знакозмінне навантаження і пружнопластичне деформування матеріалу в неізотермічних умовах при збігу по фазі температурних, силових та деформаційних циклів. Такий вид випробувань називається термічною втомою або скорочено термовтомою.

Електроконтактний метод нагріву в основному використовується при випробуваннях на термовтому, незважаючи на те що він має ряд суттєвих недоліків, які методично важко подолати. **Основним недоліком** методу є нерівномірний розподіл температури за довжиною та перерізом зразка. Температурна крива по робочій довжині досить добре апроксимується параболою. Нерівномірний розподіл температури по довжині зразка методичними заходами виключити не можна, його можна тільки враховувати. Температурний градієнт у поперечному перерізі особливо рельєфно виражений для суцільних циліндричних зразків за рахунок більш інтенсивного відведення тепла з поверхні, де температура може бути значно нижчою, ніж по осі зразка. Поперечні градієнти є джерелами помилок відносно характеристик міцності матеріалу. Однак на відміну від поздовжніх вони можуть бути практично виключені завдяки використанню тонкостінних трубчастих зразків. У таких зразках температурним градієнтом по товщині стінки можна знехтувати у зв'язку з його малістю без шкоди для точності вимірювання. Тому при випробуваннях на термовтому основне застосування знаходять трубчасті тонкостінні зразки.

Випробування на термовтому досить поширені у практиці механічних випробувань, оскільки вони дозволяють досить точно імітувати умови роботи матеріалу, притаманні великій групі устаткування різного призначення. За інших видів випробувань цей метод нагрівання практично не використовується. Так, при випробуваннях на короткочасну міцність, тривалу міцність

і повзучість у процесі навантаження зазвичай відбувається видовження зразків і нерівномірна по довжині зміна площі їх поперечного перерізу. Таке нерівномірне деформування при електроконтактному нагріванні завжди супроводжується появою зон, в яких підвищується щільність електричного струму, а отже, і температура, що призводить до ще більшої неоднорідності деформування матеріалу. Цей метод також не можна використовувати при випробуваннях зразків на статичну та циклічну тріщиностійкість через появу зон локального нагрівання у вершині тріщини.

Плазмовий нагрів заснований на використанні конвективного теплообміну між низькотемпературною плазмою, яка отримується під час продування робочого газу через електричну дугу, і об'єктом дослідження. Генератор низькотемпературної плазми (він також називається плазмотроном) дозволяє отримати в зоні електричної дуги, що виникає між анодом і катодом, температуру до 12000К. Через область електричного розряду з такою високою температурою продувається газ, в якості якого найчастіше використовується повітря з різними домішками або аргоном. При механічних випробуваннях за допомогою плазмотронів отримують робочі температури до 3000 К, які не є граничними для цього методу.

Основне застосування плазмовий метод нагріву знаходить при випробуваннях різних теплозахисних покриттів, які в експлуатаційних умовах піддаються односторонньому інтенсивному нагріванню з високими швидкостями, що досягають кількох сотень градусів за секунду [28].

З великої кількості різних установок конвективного нагрівання при таких випробуваннях найбільшого поширення набули установки з підігрівачем плазмотронного типу і повітрям в якості робочого середовища.

Схему такої установки показано на рис. 5.6.

Вона складається з власне плазмотрона, системи подачі повітря 1, системи регулювання питомого теплового потоку 8 та системи живлення 2 з блоком запалювання дуги, яка виникає між анодом 6 та катодом 12 плазмотрона. Електроди плазмотрону можуть виконуватися з міді (як показано на рис. 5.6, у цьому випадку вони є водоохолоджуваними), вольфраму, що покривається оксидом торію, або вугілля.

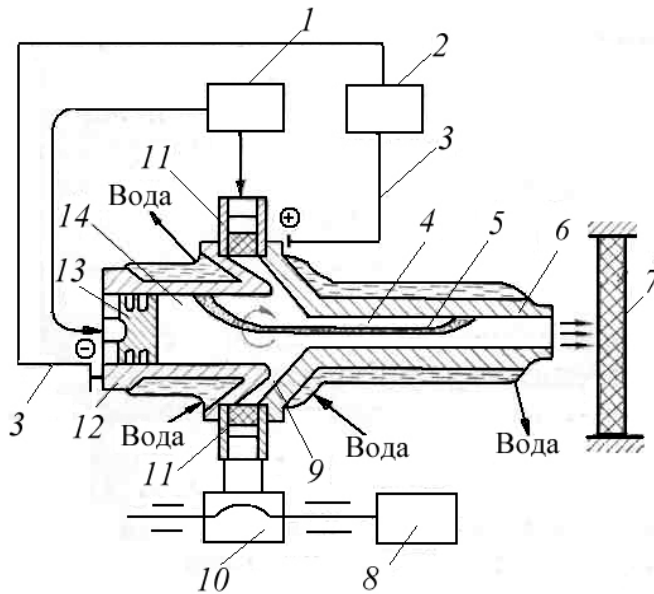


Рис. 5.6 Схема установки для плазмового конвективного нагріву

Електричний розряд виникає між анодом і катодом в основному каналі 4 плазмотрона, через який під невеликим надлишковим тиском (до 0,05 МПа) продувається повітря. Повітря в бічний 9 і центральний канали 14 плазмотрона подається через завихрювачі 11 і 13. Нагріте до необхідної температури іонізоване повітря проходить по осьовому каналу 4 анода і подається на об'єкт дослідження 7. У плазмотроні цього типу розрядний шнур 5 підхоплюється повітряними потоками, що сприяє безперервному його обертанню та запобігає прогоранню анода та катода в основі дуги. До складу джерела живлення плазмотрона входить зварювальний трансформатор з крутопадаючою вольт-амперною характеристикою, що живиться від мережі напругою 380В, і напівпровідниковий випрямляч. Робочий електричний струм (постійний) силою до 800 А підводиться до анода і катода по мідних шинах 3 з надійною ізоляцією (робоча напруга плазмотрона 80 В). Потужність питомого теплового потоку, що надходить на зразок, автоматично регулюється за допомогою керованого електромеханічного приводу 10, який по заданій програмі змінює відстань від зрізу сопла анода плазмотрона до робочої поверхні зразка. Плазмотрон може встановлюватися і переміщатися по відношенню до зразка в будь-якому напрямку. Якщо виникає необхідність у рівномірному нагріванні об'єкта, що досліджується, по периметру його перерізу встановлюються кілька плазмотронів. Швидкість теплового потоку регулюється шляхом зміни тиску робочого газу.

До переваг плазмового методу в порівнянні з іншими методами нагрівання можна віднести можливість створення потужних теплових потоків, що забезпечують нагрівання з високими швидкостями, можливість отримання

мання дуже високих робочих температур при конвективному теплообміні в умовах повітряного середовища та аеродинамічного напору. Крім того, цей метод забезпечує можливість моделювання на поверхні досліджуваного об'єкта різних хімічних процесів шляхом використання в якості робочого тіла суміші газів необхідного складу і шляхом введення різних добавок у конвективний потік, що формується на виході плазмотрона.

5.2.2 Камери для дослідження при високих і низьких температурах, методи охолодження

Температурні камери є невід'ємною частиною установок для механічних випробувань. Вони забезпечують формування робочого середовища та температурного режиму в зоні об'єкта дослідження. У зв'язку з дуже широким інтервалом реалізованих при механічних випробуваннях робочих температур конструктивне оформлення температурних камер різного призначення суттєво відрізняється. За температурною ознакою їх можна розділити на два великі класи:

- на камери, призначені для випробування при високих температурах;
- камери, що забезпечують отримання низьких температур.

Камери для випробувань до 700К рекомендується називати термокамерами, а для більш високих температур – електричними печами, які умовно ділять на повітряні (до 1700К), для інертного газу (до 2000К) і вакуумні (до 3500К) [23].

У низькотемпературній області використовуються кріокамери (77-273К) та кріостати (1,5-140К). Випробування в парах газоподібних холодоагентів при знижених (кліматичних і перехідних) і кріогенних (не нижче 77К) температурах проводяться в кріокамерах, а випробування в кріогенних рідинах і в парах гелію (а в деяких випадках і в паразі азоту) - в кріостатах.

Функціональне призначення камер для високих і низьких температур принципово відрізняється. Термокамери та печі конструюються таким чином, щоб локалізувати зону високих температур поблизу зразка та запобігти витоку тепла у навколишнє середовище. Призначення кріокамер і кріостатів полягає в тому, щоб відсікти всі потоки тепла ззовні в зону зразка і зберегти в цій зоні рідку ванну холодоагенту або охолоджену суміш газу і пари.

Термокамери. Переважно вони використовуються для випробування таких неметалевих матеріалів як гуми, пластмаси, текстиль, папір. Вимірювати температуру для матеріалів з низькою теплопровідністю безпосередньо на зразку важко і при їх випробуваннях температурний рівень регламентується робочим об'ємом термокамери. У зв'язку з цим тепло від

нагрівачів до зразка в термокамерах передається шляхом конвекції за рахунок природної або примусової циркуляції теплоносія, в якості якого може використовуватися газ або рідина. Корпус термокамер виконується з подвійними стінками з листового металу. Простір між стінками заповнюється теплоізолюючим матеріалом. Як нагрівач в термокамерах застосовується дріт або стрижні з ніхрому.

Електричні печі. У цих печах тепло від нагрівача до зразка передається переважно випромінюванням, а відведення тепла від зразка до захватів здійснюється за рахунок теплопровідності. У зв'язку з цим по довжині зразка виникає градієнт температури, для зменшення якого електричні нагрівачі виконуються багатосекційними з автономним управлінням кожною секцією.

Потужність, що підводиться від системи нагріву, розподіляється між секціями нагрівачів таким чином, щоб забезпечити більш високу температуру в торцевих зонах печі, що нагрівають більш холодні ділянки зразків. Для зменшення витрат часу на встановлення та демонтаж зразка, печі, що використовуються для випробувань на короткочасну міцність, виконуються роз'ємними. Електропечі для тривалих випробувань можуть бути нероз'ємними, тому що при таких випробуваннях заміна зразка проводиться через великі інтервали часу, що досягають кількох місяців або навіть років. Типова конструкція циліндричної трисекційної муфельної печі нероз'ємного типу показана на рис. 5.7. Ця піч призначена для використання в установках для випробувань на тривалу міцність та повзучість. Трисекційний нагрівач 2 з ніхромового дроту розміщений у вигляді спіральної намотки на керамічній вогнетривкій трубі 1. Розташування нагрівача по відношенню до труби може бути зовнішнім або внутрішнім.

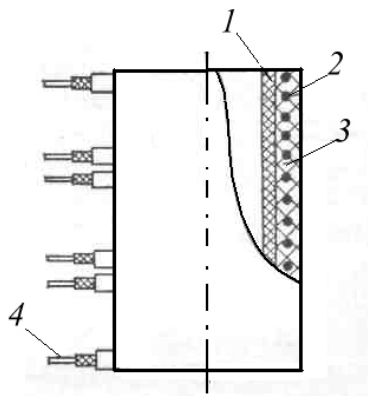


Рис. 5.7 Муфельна електрична піч опору із трисекційним нагрівачем

При зовнішньому розташуванні (як показано на рис. 5.7) застосовують додаткову обмазку 3 нагрівача, яка є теплоізоляцією і служить для фіксації положення нагрівача. При внутрішньому розташуванні нагрівальні елементи укладаються в спіральні пази, виконані у вогнетривкій трубі. Живлення сек-

цій нагрівача є автономним і здійснюється від системи нагріву через виводи 4. У машинах для випробувань на втому з горизонтальним розташуванням зразків застосовуються горизонтальні електричні печі з роз'ємом по твірній для забезпечення доступу до зразка. У зв'язку з обмеженістю робочого простору в машинах втоми в зоні зразка печі виконуються компактними і з великим шаром ізоляції. Для запобігання надмірному нагріванню зовнішньої поверхні печі передбачається водяне охолодження корпусу.

Електричні печі для випробувань у вакуумі та середовищі інертного газу. Ці печі відрізняються від повітряних електричних печей конструктивним оформленням, особливість якого обумовлена високими температурами випробувань і необхідністю використання в якості матеріалів нагрівальних елементів тугоплавких сплавів, що інтенсивно окислюються на повітрі. Обов'язковим елементом вакуумних печей і печей з інертним газом є герметичні камери, в яких розміщуються відкриті стрижневі, пластинчасті або дротяні (у вигляді спіральної намотки) нагрівачі, що утворюють замкнутий контур нагрівання. Нагрівачі закріплюються в мідних водоохолоджуваних струмопідводах, які через герметичні ущільнення виводяться з камери. Передача тепла в таких електричних печах здійснюється виключно шляхом випромінювання, що є дуже ефективним видом теплопередачі у вакуумі.

Розрідження в камерах створюється вакуумними системами, в які входять вакуумні насоси і трубопроводи, що з'єднують їх з камерою. Для отримання низького вакууму (до $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па) використовуються форвакуумні насоси; середній вакуум (до $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) отримують за допомогою парострумних дифузійних насосів, високий (до $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па) та надвисокий вакуум (до $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па і більше) – за допомогою магнітних електророзрядних вакуумних насосів. Системи нагріву, що застосовуються в електричних печах для випробувань у вакуумі та інертному середовищі, аналогічні системам нагріву, які використовуються для повітряних електричних печей опору та при електроконтактному нагріві.

В якості робочого інертного середовища зазвичай використовують газоподібний аргон, який подають в камеру після досягнення в ній низького або середнього вакууму. Щоб уникнути підсмоктування атмосферного повітря в електропіч і забруднення газового інертного середовища, у ній створюється надлишковий тиск аргону.

Для забезпечення герметичності вакуумних камер і стабільності створеного в них вакууму пред'являються жорсткі вимоги до матеріалів, що використовуються для виготовлення камер, і до матеріалів вакуумних ущільнень, а також до дотримання певних принципів конструювання вакуумних камер і до технології їх виготовлення.

Корпус камери та трубопроводи вакуумної системи виготовляють з корозійностійких сталей (для цього, як правило, використовують сталь 12X18H10T) з добре обробленою та відполірованою поверхнею для зменшення газовиділення та полегшення процедури очищення камери від забруднень у процесі експлуатації. Якщо вакуумна камера призначена для випробувань у низькому та середньому вакуумі, всі ущільнення в кришках, струмоміпроводах, оглядових вікнах та інших деталях, що мають роз'ємні з'єднання на межі вакуум-довкілля, виконуються з вакуумної гуми. Перед випробуваннями необхідно обробляти внутрішні поверхні електропечі та вакуумних трубопроводів знежирюючими складами (бензином, спиртом або чотирихлористим вуглецем). Для цієї ж мети проводиться попереднє знегажування гуми при підвищених температурах протягом декількох десятків годин. Знегажування корпусу камери, трубопроводів, теплоізоляційних екранів відбувається природним шляхом у початковий період випробувань при робочих температурах.

Вимоги до герметичності вакуумних систем, призначених для випробувань у високому та надвисокому вакуумі, більш жорсткі, ніж у системах з низьким та середнім вакуумом. Характерною особливістю цих систем є відсутність гумових ущільнень і необхідність зовнішнього прогріву до 600-900K для знегажування внутрішніх поверхонь вакуумної системи. Роз'ємні з'єднання в таких системах виконуються з металевими прокладками, зазвичай листової міді товщиною 0,5 мм. Деталі камери та трубопроводу виготовляються з високоякісних сортів корозійностійких сталей, що виключають навіть незначні дефекти металу.

Нагрівачі в електричних вакуумних печах виконуються дво- або трисекційними для випробувань довгих зразків (100 мм і більше) та односекційними для випробувань більш коротких зразків. На рис. 5.8 показана конструкція високотемпературної вакуумної печі з односекційним нагрівачем з вольфрамових стрижнів 3, які закріплені в ніобієвих водоохолоджуваних струмоводах 5 [23]. Теплоізоляційні екрани 2, які зберігають корпус 1 вакуумної камери від нагрівання випромінюванням, виготовлені з набору вольфрамових та молібденових листів.

Температуру до 2100K вимірюють вольфрам-ренієвими термопарами, що вводяться в камеру через спеціальне вакуумне введення (на малюнку не показаний), а при більш високих температурах – оптичним пірометром через оглядове вікно 7, що закривається поворотною шторкою 8.

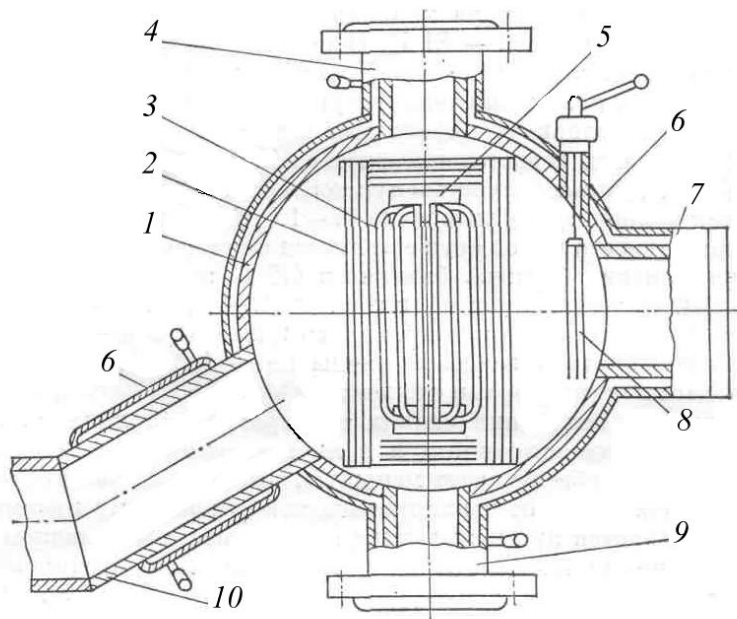


Рис. 5.8 Вакуумная электропечь

Электропечь предназначена для випробування зразків у середньому вакуумі і тому всі вакуумні ущільнення виконані з гуми. Екрани і нагрівачі з струмопідводами укріплені на двох торцевих кришках. У печах такого типу верхній і нижній захвати зразка вводяться у внутрішній простір камери через верхню 4 і 9 нижню горловини, герметизовані сільфонами. Для запобігання перегріву корпусу камери та вакуумних трубопроводів зазвичай передбачається їх охолодження проточною водою, що циркулює під невеликим тиском у порожнинах, обмежених кожухом 6. Гази з камери відкачуються вакуумними насосами через трубопровід 10.

Кріокамери та кріостати. Для охолодження зразків та елементів конструкцій застосовується три способи [44]:

- занурення в рідкий холодоагент;
- конвективне відведення тепла за допомогою газового середовища;
- відведення тепла по металевому холодопроводу. Вибір способу охолодження та типу холодоагенту залежить від робочої температури, виду та тривалості випробувань.

Для охолодження в області низьких кліматичних температур можна використовувати суміш льоду з сіллю, тверду вуглекислоту в чистому вигляді або суміші з чотирьохлористим вуглецем або зі спиртом. Однак найбільш методично прийнятним є спосіб охолодження, заснований на використанні рідкого азоту, що пов'язано з його доступністю, низькою вартістю та безпекою.

Температури до 160К можна отримувати в розчині спирту з азотом, причому зі збільшенням концентрації спирту в азоті температура розчину підвищується. Для охолодження в інтервалі температур 160-130К використовують розчин петролейного спирту з азотом. Нижчі температури (практично до 95К) отримують у розчині азоту з ізопентаном чи парах азоту. В області температур від 77 до 1,5К для охолодження використовуються різні скраплені гази та їх пари. Це - рідкий азот з температурою кипіння при атмосферному тиску 77К, рідкий неон з температурою кипіння 26,1К, рідкий водень і рідкий гелій з температурою кипіння відповідно 20 і 4,2К. Нагадаємо, що температура кипіння рідкого кисню становить 90К, а рідкого повітря – 81К. Основним холодоагентом при температурах до 77К є азот. Хорошим та зручним у користуванні холодоагентом для отримання температури нижче 77К є рідкий неон та його пари, проте він дефіцитний та дорогий газ. Застосування водню пов'язане з вибухонебезпечністю при контакті з повітрям. Тому для отримання температур в інтервалі 77-1,5К використовують рідкий гелій; за допомогою його пари здійснюється охолодження аж до температури кипіння (однак, близькі до 4,2К температури дуже нестабільні), а температурний інтервал 4,2-1,5К досягається за рахунок відкачування парів над ванною рідкого гелію. При цьому постійна задана температура гелієвої ванни нижче 4,2К підтримується спеціальними регуляторами тиску.

Камери для отримання низьких температур виконуються у двох варіантах – з двостороннім та з одностороннім введенням захватів. Перший варіант забезпечує менший, ніж другий, захист рідкої ванни з холодоагентом від теплоприпливу ззовні і тому переважно використовується при випробуваннях в парах азоту і рідкому азоті. Отже, кріокамери, призначені для формування в робочій зоні зразка температур в діапазоні від 273 до 77К, азотні кріостати (77К) мають два силових вводи.

Гелієві кріостати виконуються реверсивними з одностороннім вводом силових елементів. В цьому випадку навантаження до зразка передається через довгі вставлені одна в одну з верхньої сторони кріостата тяги. Така конструкція дозволяє знизити теплопритік у робочу зону, зменшити температурні градієнти по довжині захватів та отримати в кріостаті ванну рідкого гелію.

Необхідно відзначити, що при розробці гелієвих кріостатів основна увага повинна приділятися зменшенню теплопритоку в зону зразка. Це пов'язано з тим, що рідкий гелій при низьких температурах має малу теплоємність і малу теплоту випаровування і легко випаровується, тому для проведення випробувань потрібна велика його кількість. Так, при випаровуванні 1л рідкого азоту при температурі кипіння 77К поглинається 38,4 ккал тепла,

а при випаровуванні 1 л гелію набагато менше - всього 0,67 ккал. При неправильному проектуванні та виготовленні гелієвого кріостата взагалі не можна залити рідкий гелій, оскільки він за рахунок існуючих теплопритоків випарується перш, ніж досягне дна кріостата.

Конструкція реверсивного кріостата, виконаного з урахуванням необхідності проведення тривалих випробувань, показана на рис. 5.9 [44]. Робоча порожнина 3 кріостата 5 для зменшення теплоприпливу в зону зразка 2 ізолювана від навколишнього середовища двома вакуумними сорочками 18 і 19 і одним азотним екраном 20, а силовий стакан 7 омивається рідким азотом, що знаходиться в ємності 8 охолоджуючого пристрою 9.

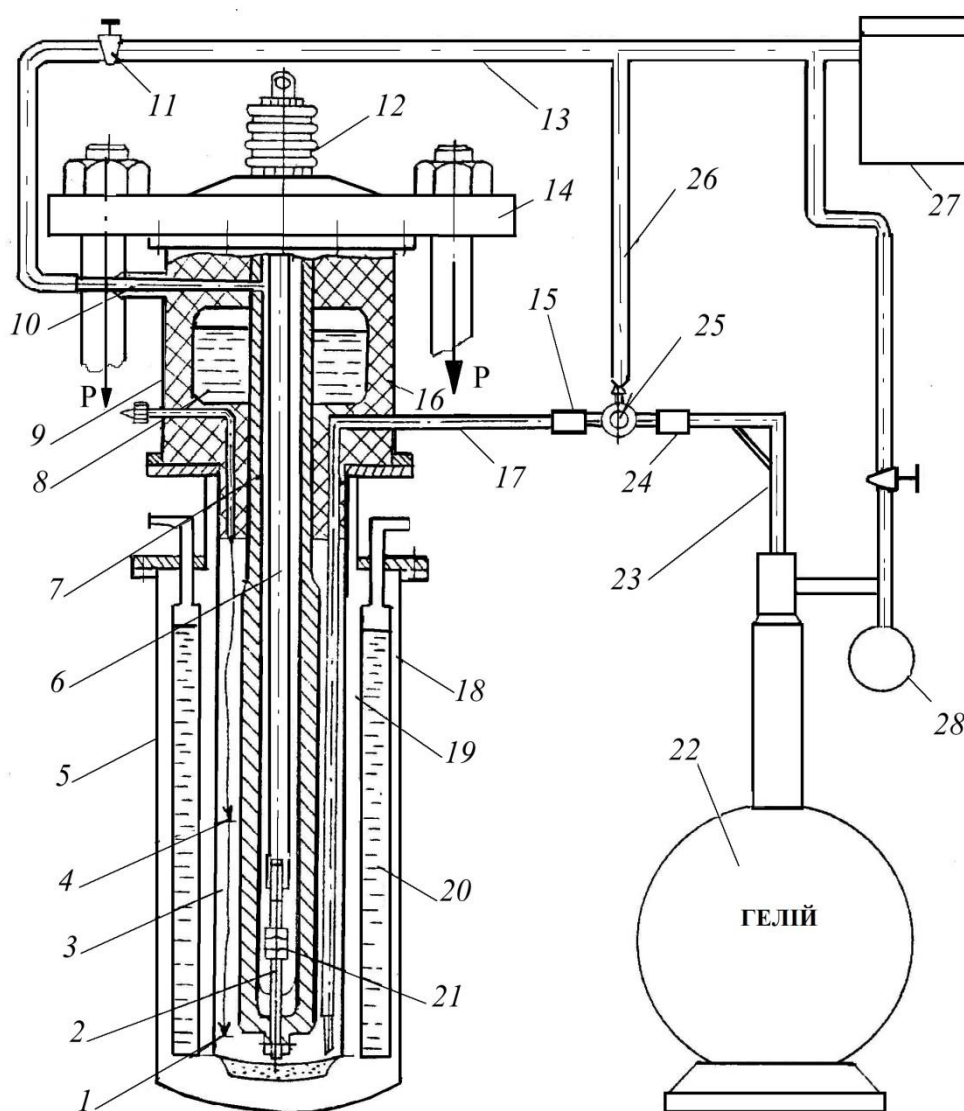


Рис. 5.9 Гелієвий кріостат

Азотна ємність і горловина кріостата екрануються від зовнішнього середовища за допомогою теплоізоляційної набивки 16. Герметичність внут-

рішньої порожнини забезпечується завдяки використанню в роз'ємних з'єднаннях фторопластових прокладок. Крім того, між тягою *6* і траверсою *14* встановлений сильфон *12* для герметизації місця виведення тяги з кріостата. Зразок для випробувань на розтяг кріпиться однією головкою до силового стакану, всередині якого співвісно проходить тяга, а другий – до цієї тяги.

Силовий стакан жорстко пов'язаний з опорною плитою і колонами, через які до зразку від приводу випробувальної машини прикладається навантаження розтягу. Тяга, виведена з кріостата через сильфонне ущільнення, у процесі випробувань залишається нерухомою. Така конструкція співвісно розташованих тяги і силового стакану, завдяки якій вони мають одностороннє введення в кріостат, є типовою для реверсивних кріостатів гелієвих і дозволяє звести до мінімуму кількість теплових мостів з навколишнього середовища в кріостат. Єдиним таким потужним тепловим мостом у кріостатах реверсивного типу є тяга, що охолоджується у верхній теплій зоні лише парами відпрацьованого гелію. Слід підкреслити, що від підготовки кріостата до випробувань і від способу заливки гелію багато в чому залежить можливість отримання його рідкої ванни в кріостаті, так як процедура заливки гелію вимагає обов'язкового дотримання черговості певних етапів як при першому, так і наступних заливаннях.

Перед заливкою в кріостат за допомогою форвакуумного насоса створюється низький вакуум. Після цього в його робочий об'єм починає подаватися газоподібний гелій з посудини Дьюара *22* через знімну переливалку *23*, гумові муфти *15*, *24*, розподільний гелієвий клапан *25* і робочу переливалку *17*. Після охолодження зразка і деталей парами гелію тиск в посудині Дьюара підвищується за допомогою гумової камери *28* і в кріостат починає подаватися рідкий гелій. Відпрацьовані пари гелію при першій заливці видаляються з кріостата в газгольдер *27* через патрубки *10*, вентиль *11* і гелієву магістраль *13*, проходячи по кільцевому проміжку між стаканом і тягою охолоджуючи ці деталі. При повторних заливках гелію в процесі тривалих випробувань для зменшення його витрати трубопроводи, якими гелій подається з посудини Дьюара в кріостат, попередньо охолоджуються. Для цього призначений розподільний гелієвий клапан, виконаний з можливістю підключення робочої порожнини кріостата і посудини Дьюара до газгольдера через трубопровід *26* або робочої порожнини до посудини Дьюара.

Хід заливки рідкого гелію контролюється двома напівпровідниковими рівнемірами *1* і *4*, а температура зразка визначається за допомогою германієвого термістора *21*, поміщеного у фторопластову капсулу і щільно прилеглого до робочої частини зразка.

Гелієві рівнеміри сигналізують про наявність рідкого гелію на дні робочої порожнини кріостата і над зразком. Після того як рівень гелію в робочій порожнині кріостата досягне верхнього рівнеміра, заливка припиняється. Всі дозаливки холодоагенту робляться без зупинки випробувань зразка, температура якого в процесі підготовки та під час заливання практично не змінюється (коливання температури становлять 1-2 °С). Однією заливкою рідкого гелію в кріостаті даної конструкції забезпечується проведення випробувань протягом 1-1,5 год, що є дуже хорошим показником для гелієвих кріостатів.

Кріокамери та кріостати з двостороннім введенням силових елементів використовуються при випробуваннях у парах та в середовищі рідкого азоту, теплоємність і теплота випаровування якого значно вища, ніж у гелію. Для випаровування азоту та підігріву його пари потрібно підвести в кріостат значно більше тепла, ніж для випаровування гелію, і тому азотні кріостати вимагають меншої теплоізоляції і більш прості за конструктивним оформленням, ніж гелієві.

Найпростіша конструкція азотного кріостата для випробувань на короточасну міцність наведена на рис. 5.10, а на рис. 5.11 показано кріокамеру для випробувань на втому. Кріостат виконують у вигляді внутрішньої 1 і зовнішньої 3 обичайок, між якими знаходиться теплова ізоляція 2 (міпора, пінопластова крихта або мінеральна вата). Біля нижнього захвату 5 в кріостаті встановлюється фторопластове ущільнення 4, що запобігає протокі азоту. У кріостатах, призначених для тривалих випробувань на повзучість або втому, між двома обичайками створюється вакуум, що забезпечує хорошу теплоізоляцію та зменшення витрати холодоагенту.

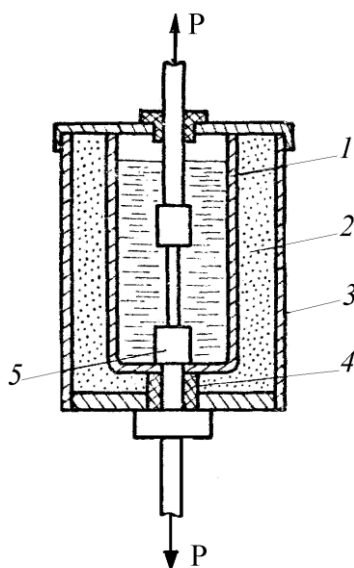


Рис. 5.10 Азотний кріостат

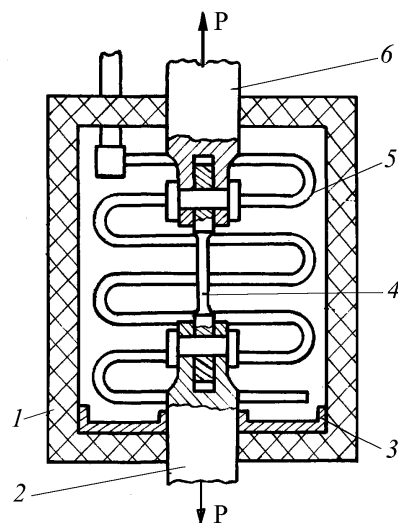


Рис. 5.11 Кріокамера

Кріокамери зазвичай виготовляються з пінопласту або так само, як і кріостати, з двох металевих обичайок з теплоізоляційним шаром між ними. Показана на рис. 5.11 кріокамера з пінопласту складається з двох симетричних половинок, що мають роз'єм у вертикальній площині і з'єднаних між собою пружними затискачами, при цьому одна з половинок корпусу 1 жорстко закріплена на станині втомної машини, а друга фіксується тільки після установки в робочому положенні зразка 4, який жорстко закріплюється в рухомій 2 і нерухомій 6 тягах захватів.

Пари азоту подаються в камеру трубопроводу з посудини Дьюара з рідким азотом через розпилювач-змійовик 5; в камері передбачений накопичувач 3, в який стікає надлишковий рідкий азот з розпилювача при випробуваннях в області температур, близьких до температури кипіння азоту.

Необхідно відзначити, що конструкції азотних кріостатів і кріокамер для випробувань у парах азоту можуть бути дуже різноманітними залежно від розміру зразків, виду та тривалості випробувань і можуть виготовлятися з різних матеріалів. Ці кріостати та кріокамери не мають такої одноманітності у конструктивному виконанні, як гелієві, виготовлення яких потребує високої культури виробництва та застосування високоякісних хромонікелевих та мідних сплавів.

5.3 Методи і засоби вимірювання температури

Для вимірювання температури при механічних випробуваннях застосовують [23]:

- термоперетворювачі опору;
- термоелектричні перетворювачі;
- рідинні термометри;
- пірометри.

Найбільшого поширення нині отримали термоелектричні перетворювачі (термопари) і термоперетворювачі опору (напівпровідникові і дротяні), які дозволяють проводити вимірювання в широкому інтервалі низьких і високих температур (4,2- 2800К). Ці перетворювачі широко використовуються як датчики в автоматизованих системах нагріву із замкнутим контуром регулювання.

Термоелектричні перетворювачі. Чутливим елементом перетворювача є термопара, яка складається з двох дротяних електродів з різнорідних металів, які з'єднуються на вільних кінцях за допомогою паяння або зварювання. Спай, який встановлюється на досліджуваному об'єкті, називається робочим. Якщо температура робочого і вільного кінців термопари відрізня-

ються, то в ланцюзі термопар виникає термоЕРС, пропорційна різниці температур робочого і вільного спаїв. Вимірюючи термо ЕРС, за графіками та-рування можна визначити температуру робочого спаю, а значить, і темпера-туру локальної зони досліджуваного об'єкта, в якій закріплена термопара. При використанні термопар у ланцюзі регулювання температури електрич-ний сигнал, що виникає в контурі вимірювання, посилюється і перетворю-ється таким же чином, як і сигнал від тензорезисторів в автоматизованих системах управління режимом і завантаження.

Термоелектричні перетворювачі випускаються в різному виконанні в залежності від умов випробувань, режимів та тривалості навантаження. Роз-різняють поверхневі та занурювані перетворювачі, стаціонарні та переносні, звичайні, пилозахищені, водозахищені, вибухозахищені та вібростійкі. За кількістю чутливих елементів для вимірювання температури в одній зоні термоелектричні перетворювачі поділяють на одинарні, подвійні і т.д.

У табл. 5.1 наведено основні типи перетворювачів та їх характеристики.

Для вимірювання низьких температур застосовуються мідь-копелеві, хромель-копелеві, хромель-алюмелеві, залізо-константанові та мідь-константанові перетворювачі. Причому останні набули найбільшого поши-рення для низькотемпературних вимірювань з нижньою межею до 77 К. При нижчих температурах термопар не використовуються через їх невисоку чутливість і значні похибки вимірювання.

Таблиця 5.1 Основні параметри термоелектричних перетворювачів [23]

Тип перетво-рювача	Марка	Матеріал термоелектродів	Вимірювані тем-ператури за три-валих випробу-вань, К	Гранична температу-ра вимірювання за короточасних ви-пробувань, К
ТПР	ПР-30/6	Платинородій (30 % родія) - платинородій (6 % родія)	573-1873	2073
ТПШ	ПП	Платинородій (10 % родія) - платина	273-1573	1873
ТХА	ХА	Хромель-алюмель	223-1273	1573
ТХК	ХК	Хромель-копель	223-873	1073
ТВР	ВР 5/20	Вольфрамрений (5 % ренія) - вольфрамрений (20 % ренія)	273-2073	2773

В області підвищених і високих температур основне застосування знаходять хромель-алюмелеві термомпари (до 1300К), що мають лінійну характеристику і високий рівень вихідного сигналу. При більш високих температурах в основному використовуються платинородій-платинові термомпари (практично до 1600К) та вольфрамренієві; причому останні можуть застосовуватися тільки у вакуумі та в чистих середовищах, так як при високих температурах повітря вони інтенсивно окислюються.

Термоперетворювачі опору. Принцип дії цих перетворювачів ґрунтується на використанні властивості чутливого елемента змінювати опір при зміні температури. Вони виготовляються з дроту або напівпровідникових матеріалів. Чутливий елемент дротяних перетворювачів, які називаються терморезисторами, є намотаною на каркас з ізоляційного матеріалу спіраллю. Каркас зі спіраллю розміщується в металеву або скляну гільзу, що заповнюється гелієм або порошком оксиду алюмінію.

Для виготовлення чутливих елементів дротяних перетворювачів використовується мідь або платина. Мідні перетворювачі дозволяють вимірювати температуру в інтервалі 77-475К, а платинові – в інтервалі 13-1400К. Найбільше застосування у випробувальній техніці отримали серійні платинові перетворювачі ТСП-5071 з межами вимірювання 77-900К.

Напівпровідникові термоперетворювачі опору, які називаються термісторами, відрізняються великим електричним опором, малими розмірами та високою міцністю. У зв'язку з тим, що їхня градувальна характеристика є нелінійною, вони вимагають індивідуального тарування. Широке застосування термістори знаходять при вимірі дуже низьких температур в температурній області, яка лежить за межами можливостей терморезисторів і термомпар. Так, для вимірювання температур від 1,5 до 77 К використовуються термістори з чутливим елементом - кристалом германію. Слід зазначити, що в якості чутливих елементів термісторів використовуються ті ж напівпровідникові матеріали, які застосовуються для виготовлення напівпровідникових тензорезисторів. Тільки зміна опору тензорезисторів обумовлена деформацією напівпровідникового кристала, а зміна опору термісторів пов'язана зі зміною температури. Тому умови кріплення термісторів до поверхні об'єкта, температура якого підлягає виміру, повинні унеможливити механічне деформування кристала або його навантаження. Виникаючий за рахунок механічного впливу електричний сигнал у ланцюзі вимірювання не можна відокремити від сигналу, ініційованого зміною температури, що може внести значну похибку у вимірювання температури.

Рідинні термометри. Ці термометри застосовують для контролю температури. Їх поділяють на лабораторні, технічні, медичні, метеорологічні та

інші. При проведенні макроексперименту в основному застосовуються лабораторні скляні термометри, в яких в якості наповнювача (термометричної рідини) використовують ртуть, толуол, спирт, гас, петролейний ефір. Межі вимірювання температури лабораторних ртутних термометрів 243-573 К, а нертутних рідинних 77-473 К.

У випробувальних пристроях широко застосовується ртутний електроконтактний термометр, що забезпечує позиційне регулювання температури, в капілярі якого за допомогою магнітної головки переміщається рухомий робочий контакт. Контакт встановлюється за шкалою термометра на потрібний рівень, і при досягненні відповідної цьому рівню температури ртуть, що переміщується при розширенні по капіляру, замикає електричний ланцюг регулятора, який дає сигнал про таке перемикання пристрою нагріву, після чого відбувається зниження температури до певного рівня з подальшим підвищенням. Ці термометри дозволяють стабілізувати тепловий режим на будь-якому температурному рівні в межах шкали термометра (243-573 К).

Дилатометр. Це механічний датчик, призначений для регулювання температури в системах з високою інерційністю. Принцип дії дилатометра заснований на використанні властивості матеріалів змінювати свої розміри при зміні температури в установках для випробувань на тривалу міцність та повзучість, тривалість яких може становити до 30 років. Очевидно, що при таких тривалих випробуваннях основною якістю регулятора повинна бути його висока надійність, і дилатометри повною мірою мають цю якість. Схема дилатометра, що використовується при тривалих випробуваннях в ізотермічних умовах, показана на рис. 5.7.

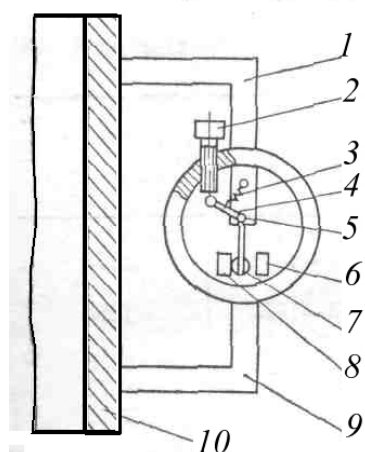


Рис. 5.7 Схема дилатометра

Тяги 1 і 9 жорстко закріплені на трубі 10, яка знаходиться в температурному полі нагрівача установки, взаємно переміщуються при зміні температури в робочій зоні. На кінці тяги 1 відносно осі 5 обертається важіль 4, на

якому встановлений рухомий контакт 7, який по черзі переміщається від одного нерухомого контакту до іншого (6 і 8). Система після тривалого прогріву налаштовується на задану температуру за допомогою регулювального гвинта 2. При підвищенні температури труба розширюється, нижній кінець гвинта переміщується вниз і впливає на головку важеля, який повертається навколо осі і замикає рухомий контакт з контактом 6. При зниженні температури важіль під дією пружини 3 повертається у вихідний стан, при цьому замикаються контакти 7 і 8, забезпечуючи комутацію відповідного ланцюга нагріву. Таким чином, дилатометр так само, як і ртутний електроконтактний термометр, забезпечує позиційний характер регулювання температури. До його недоліків можна віднести невисоку чутливість та велику інерційність.

Пірометри. Принцип дії пірометрів ґрунтується на вимірюванні сумарної енергії або складу випромінювання нагрітих тіл. Вони є дистанційним безконтактним засобом вимірювання температури. Залежно від принципу дії їх поділяють на чотири групи:

- радіаційні (пірометри сумарного випромінювання);
- оптичні (яскраві);
- фотоелектричні;
- колірні.

Дія **радіаційного пірометра** заснована на вимірюванні повної енергії випромінювання, яка пропорційна 4-му ступеню температури тіла. Основою радіаційного пірометра є телескоп, що складається з теплоприймача та оптичної системи, що концентрує на теплоприймачі сумарний променистий потік від тіла, температура якого вимірюється. Теплоприймачем зазвичай служать кілька термопар, послідовно з'єднаних з термобатарєю. При використанні радіаційного пірометра необхідно враховувати можливість поглинання теплового потоку в проміжному середовищі між телескопом і нагрітим об'єктом, що викликає похибку вимірювання, що становить до 1,5 % при вимірюванні на відстані 1 м. В якості вторинних приладів для вимірювання термоЕРС батареї термопар радіаційного пірометра застосовуються мілівольтметри та електронні потенціометри. Промисловістю випускається пірометр ПРС-019, що є телескопом для вимірювання радіаційної температури в інтервалі 300-600К.

Дія **оптичних пірометрів** полягає у вимірюванні температури за монохроматичною яскравістю тіла у видимій області спектра. Монохроматична яскравість визначається в порівнянні з яскравістю нитки еталонної лампи, температура якої відома. Зазвичай при порівнянні електричний струм у нитці еталонної лампи змінюють доти, доки її яскравість не збігається з яскравістю зображення тіла і нитка не зникне на його тлі. Чутливим елемен-

том, що оцінює збіг яскравостей, є око людини. Тому оптичні пірометри відносяться до індикаційних приладів, вони не дозволяють здійснювати автоматичний запис температури і не можуть використовуватись у системах регулювання. Промисловістю випускаються кілька типів оптичних пірометрів (ОМП-054, ЛМП-066, «Промінь» та ін), які дозволяють вимірювати температуру в інтервалі 700-5300К.

Фотоелектричні пірометри є модифікацією оптичних, у яких порівняння яскравостей тіла і нитки лампи проводиться не візуально, а за допомогою фотоелемента. Принцип дії пірометра заснований на періодичному освітленні фотоелемента нагрітим тілом та лампою з частотою 50 Гц. Обидва світлові потоки змінюються в протифазі і при їх розбіжності в ланцюзі фотоелемента виникає змінна складова фотоструму, яка після посилення впливає на живлення лампи. Струм напруження лампи змінюється до тих пір, поки освітленості від лампи і тіла не зрівняються і змінна складова фотоструму не стане дорівнювати нулю. В даному випадку сила струму в лампі пов'язана з температурою об'єкта дослідження. Електричний вихідний сигнал, що використовується для визначення температури, знімається з опору, включеного в ланцюг живлення лампи. До фотоелектричних пірометрів відносяться мікропірометр ФЕМП-021 з межами вимірювання температури 1200-3900К та ФЕП-4М, що дозволяє вимірювати температуру в інтервалі 800-2300К.

Дія **колірних пірометрів** заснована на вимірюванні інтенсивності монохроматичного випромінювання тіла при заданій температурі для двох ділянок довжин хвиль, наприклад, для червоної та синьо-зеленої ділянки видимої частини спектру. Знаючи відношення цих інтенсивностей можна визначити температуру тіла, від якого вона залежить. Кольоровий пірометр «Веселка», що має кілька модифікацій, дозволяє вимірювати температуру в досить широкому інтервалі значень від 475 до 3300К.

Пірометри мають низку переваг перед контактними перетворювачами. Вони забезпечують дуже високу швидкодію вимірювань і можуть використовуватись у таких температурних діапазонах (вище 2100К) та середовищах, де контактні перетворювачі швидко втрачають свою працездатність. Крім того, їх застосування є обов'язковим в тих випадках, якщо контакт термоелектричного перетворювача з об'єктом, що досліджується, неприпустимий через спотворення його температурного поля або якщо такий контакт неможливий.

До основних недоліків пірометрів слід віднести неможливість їх застосування при вимірюванні температури в локальних зонах невеликої протяжності, а також на ділянках об'єктів, що досліджуються, з великими

градієнтами температури. Їх істотним недоліком також є і те, що результати вимірювання температури за сумарною енергією або за складом випромінювання нагрітих тіл залежать від коефіцієнта променевипромінення, точна оцінка якого в більшості випадків затруднена а, отже, затруднене точне визначення істинної температури нагрітого об'єкта. Справа в тому, що градування всіх пірометрів проводять по абсолютно чорному тілу з коефіцієнтом променевипускання (чорноти) $\varepsilon = 1$. При вимірюванні температури реальних тіл $\varepsilon < 1$, тому пірометри показують меншу температуру, ніж реальна (істинна) температура тіла.

Так, при використанні радіаційних пірометрів істинна температура може бути розрахована за формулою [23]

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}, \quad (5.2)$$

де T_p – виміряна за допомогою пірометра радіаційна температура.

При вимірюванні температури оптичним пірометром істинну температуру визначають за формулою

$$T = \left(\frac{1}{T_y} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \right)^{-1}, \quad (5.3)$$

де T_y – монохроматична температура яскравості; C_2 – постійна Планка; λ – довжина хвилі; ε_λ – монохроматичний коефіцієнт променевипромінювання, $\varepsilon_\lambda < 1$.

Якщо температура вимірюється колірним пірометром, для визначення її істинного значення використовується така формула:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_u} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2 (\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}, \quad (5.4)$$

де T_u – так звана колірна температура, яка вимірюється пірометром; λ_1 і λ_2 – довжина хвиль для двох різних монохроматичних випромінювань; ε_{λ_1} , ε_{λ_2} – монохроматичні коефіцієнти променевипускання для хвиль довжиною λ_1 і λ_2 ($\varepsilon_{\lambda_1} < 1$ і $\varepsilon_{\lambda_2} < 1$).

Як впливає з аналізу формул (5.2) – (5.4), відмінність між виміряною та справжньою температурою тіла залежить для радіаційного способу вимірювання від коефіцієнта променевипромінення, а при використанні колірних пірометрів – від довжини хвиль монохроматичних випромінювань і постійної Планка.

Радіаційні пірометри характеризуються невеликою похибкою вимірювання, розмах її абсолютного значення не перевищує 9К при температурах до 600К. Похибка вимірювання температури оптичними і колірними

пірометрами в інтервалі температур 700-5300К становить від $\pm 0,6$ до $\pm 3,0$ %, причому верхня межа цих значень похибки відповідає температурам вище 3500К.

Прилади. Найбільшого поширення для реєстрації температури отримали автоматичні мости, потенціометри, міліамперметри і вольтметри, які виконують функції зображення, запису і регулювання приладів. Принцип дії цих приладів ґрунтується на нуль-методі вимірювання з автоматичним врівноваженням.

При визначенні температури тип приладів для її реєстрації однозначно визначається типом використаного датчика температури. Так, термоелектричні перетворювачі (термопари) застосовуються в комплекті з електропотенціометрами, термоперетворювачі опору (терморезистори та термістори) – у комплекті з автоматичними мостами, а джерела уні-фікованого сигналу, якими забезпечені пірометри – у комплекті з міліамперметрами та вольтметрами [23].

Лекція 24. Методи дослідження в агресивних середовищах; класифікація методів нагріву

Лекція 25. Камери для дослідження за високих і низьких температур

Лекція 26. Методи і засоби вимірювання температури

Контрольні запитання за розділом 5

1. Агресивні рідкі середовища, спосіб нанесення рідких середовищ та особливості випробувань.
2. Вимоги до обладнання, що використовуються для випробування металів у корозійних середовищах.
3. Класифікація методів нагрівання, які використовуються у макроексперименті.
4. Нагрів в електричних печах опору.
5. Нагрів у відзеркальних печах.
6. Індукційний метод нагрівання.
7. Електроконтактне нагрівання та обмеження при його використанні.
8. Електроннопроменеве нагрівання у вакуумі.
9. Плазмовий нагрів.
10. Термокамери для випробування неметалічних матеріалів.
11. Електричні печі для випробування на повітрі.

12. Ваккумні електричні печі
13. Методи отримання низьких температур в інтервалі 1,5 – 273 К.
14. Криокамери.
15. Азотні криостати.
16. Гелієві криостати.
17. Класифікація контактних та безконтактних засобів вимірювання температури.
18. Термоелектричні перетворювачі.
19. Термоперетворювачі опору, терморезистори та термістори.
20. Рідинні термометри та дилатометри.
21. Радіаційні пірометри.
22. Оптичні та фотоелектричні пірометри.
23. Особливості використання пірометрів; колірні пірометри.

6 АНАЛІЗ, ОБРОБКА І ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

6.1 Характеристики точності і похибки вимірювання

Обробка результатів експерименту. Етап математичної обробки результатів експерименту є обов'язковою складовою будь-якого дослідження. Первинні дані, отримані безпосередньо в процесі випробувань, не завжди можуть бути використані для оцінки напружень і деформацій, що виникають в об'єкті дослідження при зовнішньому навантаженні, і тому на завершальній стадії необхідно їх перетворювати на вигляд, зручний для аналізу. Порядок такого перетворення, необхідний математичний апарат, перелік використаних для аналізу характеристик та співвідношень, а також загальні принципи обробки визначаються безпосередньо дослідником з урахуванням цілей та завдань експерименту.

Прогрес, досягнутий у сфері обчислювальної техніки, дозволяє включати до складу експериментальних комплексів із замкнутим контуром регулювання системи обробки первинних даних, засновані на використанні ПК. Ці системи за заданим алгоритмом можуть обробляти первинні дані, виконувати їх аналіз та подавати отриману інформацію у вигляді графіків або таблиць на відповідних пристроях індикації. Проте в даному випадку система обробки з ПК тільки виконує заданий дослідником набір операцій, які призводять до потрібного результату тільки в тому випадку, якщо програма обробки та аналізу базується на правильних передумовах. Як і в інших ситуаціях, в даному випадку обчислювальна техніка дозволяє розширити можливості дослідника і прискорити процес обробки та первинного аналізу отриманих експериментальних даних, але вона не здатна виробляти ідеологію наукового експерименту в цілому і ідеологію обробки та аналізу його результатів зокрема. Тому очевидно, що методи обробки та аналізу експериментальних даних повинні бути добре і в деталях освоєні експериментаторами та використовуватися ними у повсякденній практиці, незалежно від ступеня оснащення засобів експерименту обчислювальною технікою.

Витоки помилок вимірювання, їх природа і методи врахування.

Слід зазначити, що для отримання достовірних даних ще на етапі проведення випробувань необхідно виключити можливі помилки вимірювань, які за певних умов можуть суттєво спотворювати результати експерименту і призводити до неправильних висновків. Відомо, що навіть при досить точних вимірюваннях однієї й тієї ж величини результати окремих вимірів можуть

відрізнятися один від одного і, отже, містити похибки. Похибкою, або абсолютною похибкою виміру, називається різницю $x - a$ між результатом виміру x і дійсним значенням a вимірюваної величини [39].

Зазвичай похибка виміру невідома, як невідомо і дійсне значення a вимірюваної величини. Для обчислення наближеного значення з можливо меншою похибкою необхідно знати основні види похибок і вміти їх враховувати при обробці результатів.

При вимірюванні фізичних величин зустрічаються три основні джерела похибок:

- нездатність чутливого елемента приладу правильно відобразити величину, що вимірюється;
- нездатність вимірювального приладу правильно відобразити реакцію чутливого елемента на величину, що вимірюється;
- нездатність оператора, який проводить експеримент, правильно реєструвати показання приладу.

При реєстрації показань можуть зустрічатися всі три види цих джерел похибок, однак у кожному конкретному випадку основним може бути лише одне із джерел.

Ці три джерела призводять до трьох основних видів похибок:

- грубих (або промахів);
- систематичних;
- випадкових.

Грубі похибки виникають за порушення основних умов експерименту або внаслідок недогляду дослідника; дані, що містять такі помилки, не повинні розглядатися. Зовнішньою ознакою прояву грубої похибки є різка відмінність отриманого результату від інших вимірювань.

Систематичні похибки спостерігаються у випадках, коли середнє значення послідовних замірів відхиляється від відомого значення, рис. 6.1.

Ці похибки можуть бути виявлені, наприклад, при повторному калібруванні системи вимірювання і після визначення їх значення вони усуваються шляхом введення відповідних поправок у результати вимірювань. Вважають, що залишені для математичної обробки результати вимірювань не містять грубих і систематичних похибок.

До **випадкових** відносяться похибки, які в окремих вимірах можуть приймати випадкові, наперед невідомі значення, рис. 6.1. Випадкові похибки викликаються великою кількістю таких факторів, кожен з яких окремо дає незначний ефект, що не піддається самотійному врахуванню. Ці похибки є неусувними і їх не можна виключити у кожному окремому вимірюванні. Встановити абсолютну величину випадкової похибки також не можна,

зробивши єдине вимірювання, оскільки ці похибки мають статистичну природу. Їх вплив на оцінку істинного значення вимірюваної величини можна встановити тільки на основі використання методів математичної статистики та теорії ймовірностей. Випадкові похибки вимірювань характеризуються певним імовірнісним законом їх розподілу. У теоретичних роботах з математичної статистики вивчається велика кількість різних розподілів, проте в якості основного при аналізі похибок вимірювань найчастіше приймається нормальний закон розподілу - законом Гауса [39].

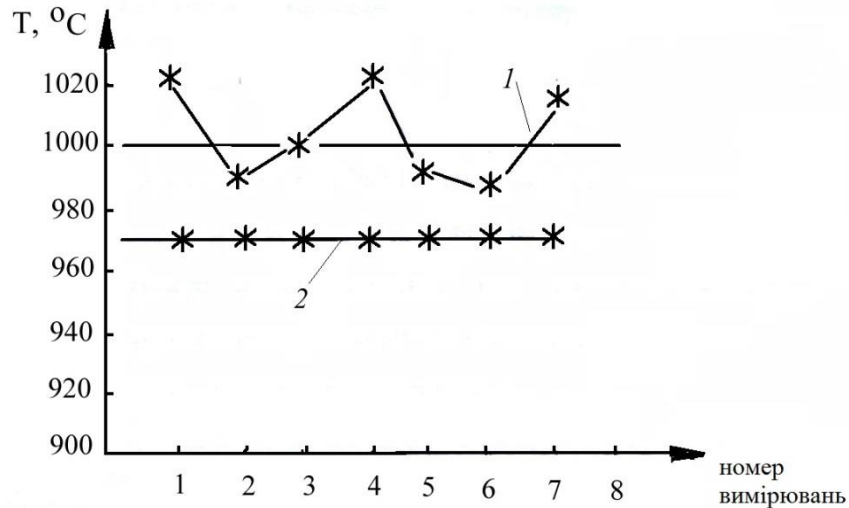


Рис. 6.1 Експериментальні дані з випадковою (1) та систематичною (2) помилками

Якщо проводити інструментальним способом вимірювання якоїсь величини, наприклад, температури, то між окремими замірами спостерігаються певні відхилення з точністю до ΔT . Після великої кількості вимірювань формується вибірка з деякої генеральної сукупності. Для рівних інтервалів величини ΔT підраховується кількість (число) замірів, які потрапляють у цей діапазон (інтервал). За результатами таких замірів будується графік залежності середніх значень T для кожного діапазону від числа замірів (частоти) n , що потрапляють у кожен діапазон, який представляє собою гістограму, як показано на рис. 6.2.

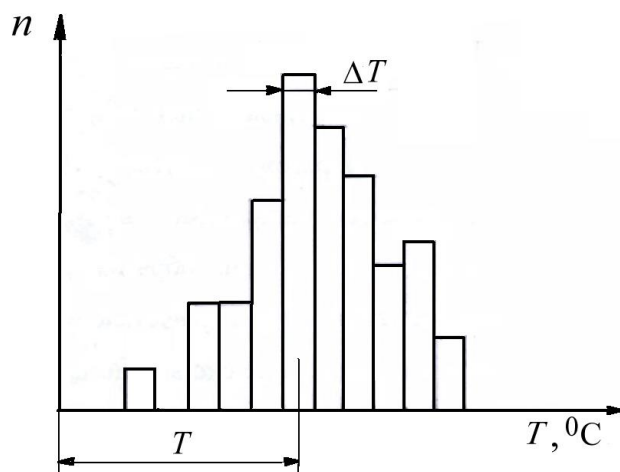


Рис. 6.2 Гістограми результатів вимірювання температури: (n – число замірів в інтервалі ΔT , T – температура р точністю до ΔT)

Якщо зробити велику кількість замірів, то інтервал ΔT буде дуже малим, і межі гістограми трансформуються в плавну криву розподілу. Як зазначалося вище, в якості кривої розподілу найчастіше використовується нормальна крива похибок, яка зветься розподілом Гаусса.

Вивід формули для розподілу Гауса, що пов'язує частоту появи відхилення з його величиною, ґрунтується на двох базових припущеннях [39]:

- по-перше, приймається, що остаточна похибка будь-якого вимірювання є результатом великої кількості дуже малих похибок, розподілених випадковим чином,

- по-друге, вважається, що позитивні і негативні відхилення відносного істинного значення рівноймовірні.

Ця формула має вигляд:

$$y = y_0 e^{-\eta^2 x^2}, \quad (6.1)$$

де y – частота появи деякого відхилення x відносно точного значення μ_x ; y_0 – частота появи нульового відхилення; η – константа, яка характеризує даний нормальний розподіл, який називається модулем або показником точності.

Приймаючи, що y_0 і η – постійні, і будуючи залежність y від x , отримуємо типову криву нормального розподілу, наведену на рис. 6.3.

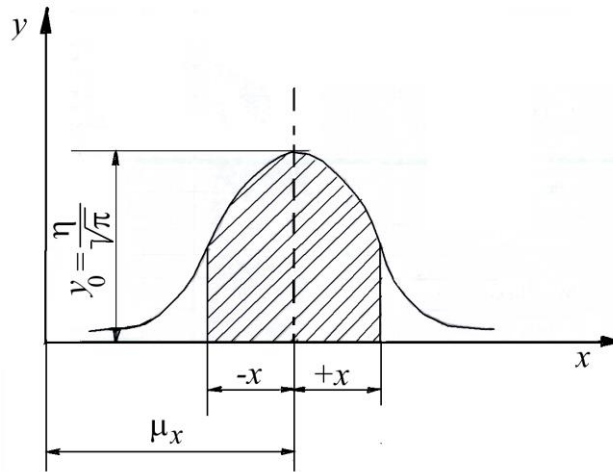


Рис. 6.3 Крива щільності нормального розподілу показань вимірювального приладу (μ_x – істинне значення вимірюваної величини, $\pm x$ – відхилення від істинного значення, y_0 – частота появи нульового відхилення, η – константа, показник точності)

Так як функція (6.1) і її крива безперервні, вони описують сукупність, що містить нескінченну множину вимірювань, яка називається генеральною сукупністю. Тобто генеральна сукупність охоплює всю множину відхилень приладів, що використовуються для вимірювань. При цьому площа A під кривою розподілу знаходиться шляхом інтегрування виразу (6.1)

$$A = 2 \int_0^{\infty} y_0 e^{-\eta^2 x^2} dx. \quad (6.2)$$

Розв'язок цього інтеграла дає результат:

$$A = \frac{\sqrt{\pi}}{\eta} y_0 \quad (6.3)$$

Площа A приймається рівною одиниці, тоді

$$\frac{y_0 \sqrt{\pi}}{\eta} = 1, \quad y_0 = \frac{\eta}{\sqrt{\pi}}$$

і формула (6.1) буде мати вигляд:

$$y = \frac{\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2 x^2} \quad (6.4)$$

Як зазначається у відповідних роботах, для вирішення практичних завдань необхідно знати ймовірність появи відхилень величин, що визначаються. З урахуванням того, що сумарна площа під кривою залежності y від x охоплює всі відхилення для даного приладу і її чисельне значення дорівнює

одиниці, ймовірність P появи відхилення, що лежить в інтервалі від $-x$ до $+x$, дорівнює площі під кривою нормального розподілу, обмеженою інтервалом $\pm x$, як показано на рис. 6.3.

Математично ця ймовірність виражається формулою:

$$P = 2 \int_{-x}^{+x} \frac{\eta}{\sqrt{\pi}} e^{-\eta^2 x^2} dx. \quad (6.5)$$

Ця формула виражає ймовірність появи будь-якого відхилення за умови, що:

- відхилення показань для приладу розподілено за нормальним законом,
- для цього приладу можна знайти значення η .

Характеристики точності вимірювальних приладів

Для оцінки точності η даної вимірювальної системи (з нормальним законом розподілу випадкових похибок) використовуються показники точності вимірювання. В якості основних показників точності, що характеризують точність вимірювання приладом необхідної величини, використовуються два показники:

- середнє квадратичне відхилення σ ;
- ймовірна похибка Φ .

Середнє квадратичне відхилення, чисельно дорівнює параметру σ , пов'язаного з кривою розподілу Гаусса, який називається стандартною похибкою або стандартом; квадрат його величини називається дисперсією похибки (σ^2).

Ця величина визначається як квадратний корінь із суми квадратів усіх відхилень, поділений на загальну кількість таких відхилень n :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} x^2}{n}}. \quad (6.6)$$

Для нормованого нормального розподілу

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 y dx \quad \text{и} \quad n = \int_{-\infty}^{+\infty} y dx = 1.0$$

Після підстановки в формулу (6.6) цих співвідношень і виразу (6.4) отримуємо

$$\sigma = \left(\frac{\eta}{\sqrt{\pi}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot e^{-\eta^2 x^2} dx \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6.7)$$

Спрощення виразу (6.7) приводить до:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\eta}} \text{ і } \eta\sigma = 0,707. \quad (6.8)$$

Тобто ймовірність того, що відхилення будуть знаходитись в межах $\pm \eta\sigma$ складає 68,2 % [39].

Необхідно підкреслити, що значення ймовірності, що дорівнює 0,682, можна отримати тільки в тому випадку, коли відхилення показань конкретного приладу відповідає нормальному закону розподілу – закону Гауса.

Ймовірна похибка Φ визначається як таке відхилення, за якого в інтервалі $\pm \Phi$ знаходиться рівно половина всієї сукупності. У разі нормального розподілу:

$$\Phi = \frac{0,477}{\eta} \quad (6.9)$$

а ймовірність знаходження відхилень в інтервалі $\pm \Phi$ становить 50%.

Ймовірна похибка характеризує область відхилень при «шансах один до одного», що означає рівноймовірну появу відхилень, що перевищують Φ і менших Φ .

У разі нормального розподілу середнє квадратичне відхилення і ймовірна похибка пов'язані нескладним співвідношенням, що випливає з (6.8) і (6.9), і знаючи одну з цих величин і η можна знайти іншу величину.

Показники точності та похибки вимірювань пов'язані з такими основними характеристиками точності вимірювальних приладів, як **клас точності, міра точності, чутливість, поріг чутливості та роздільна здатність.**

Клас точності приладу визначається значенням відносної похибки, що допускається, вираженої у відсотках - 0,2; 0,5; 1,0 і т.д. (це похибка, віднесена до одиниці вимірюваної величини).

Мірою точності h називається величина, пов'язана із середньоквадратичною похибкою вимірювання

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}}.$$

Чутливість приладу S характеризується відношенням величини відхилення індикаторів приладу Δb до зміни вимірюваної величини Δa , яка викликає це відхилення :

$$S = \frac{\Delta b}{\Delta a}. \quad (6.10)$$

Порогом чутливості називається найменше значення вимірюваної величини, здатне викликати помітне відхилення індикатора приладу.

Роздільною здатністю називається мінімальна зміна величини, яка може бути зафіксована апаратурно або оператором.

Відомо практичне правило оцінки максимальних похибок вимірювань приладів, відповідно до яких їх величини дорівнюють половині найменших поділів на шкалі приладів.

У ланцюзі вимірювання зазвичай є кілька приладів і елементів, кожен з яких характеризується своїм рівнем похибки в межах заданої точності (яка повинна бути однаковою для всіх елементів вимірювального ланцюга).

Розрахунок результуючої похибки вимірювання необхідно проводити з урахуванням усіх джерел похибок. У повну похибку визначення отриманого результату, крім результуючої похибки вимірювання, також входять похибки округлення та похибки методу апроксимації, що виникають на стадії математичної обробки отриманих даних та подання результатів у чисельному вигляді.

Визначення похибки є важливим етапом у процедурі аналізу експериментальних результатів, за яким зазвичай ідуть етапи, що мають безпосереднє відношення до математичної обробки, такі, як визначення середніх значень, підбір емпіричних формул та відшукування їх параметрів, проведення кореляційного аналізу та деякі інші.

6.2 Визначення середніх значень вимірюваних величин, аналіз результатів і підготовка звіту за результатами експерименту

При визначенні **середніх значень вимірюваної величини** передбачається, що результати вимірювань позбавлені грубих та систематичних помилок. Якщо всі n вимірів величини зроблені з однаковою точністю, то для оцінки її істинного значення застосовують середнє арифметичне значення величин x_1, x_2, \dots, x_n :

$$a \approx \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.11)$$

або середнє квадратичне відхилення величин x_1, x_2, \dots, x_n від їх середнього значення \bar{x} :

$$a \approx s^* = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.12)$$

Якщо результати вимірювань не є рівноточними, але відомі p_1, p_2, \dots, p_k - вагові коефіцієнти вимірів x_1, x_2, \dots, x_k то в якості оцінки істинного значення a

вимірюваної величини застосовують її середньо зважене арифметичне значення:

$$a \approx \bar{x} = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_k x_k}{p_1 + p_2 + \dots + p_k} = \frac{\sum p_i x_i}{\sum p_i} \quad (6.13)$$

або зважене середньо квадратичне відхилення:

$$a \approx s^* = \sqrt{\frac{p_1 (x_1 - \bar{x})^2 + \dots + p_k (x_k - \bar{x})^2}{p_1 + p_2 + \dots + p_k}} = \sqrt{\frac{\sum p_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum p_i}} \quad (6.14)$$

При великому числі вимірювань серед їх результатів можуть зустрічатися однакові за величиною; у цьому випадку відповідні складові у формулах (6.11) – (6.14) слід об'єднувати.

При експериментальному вивченні функціональної залежності однієї величини у від іншої x виконують ряд їх взаємних вимірювань і результати представляють у табличному вигляді або графічно. Після цього необхідно підібрати емпіричні формули, що описують результати експерименту. Вони вибираються з формул певного типу. Наприклад, при лінійній апроксимації отриманих даних використовуються формули типу $y = ax + b$; якщо ці дані описуються степеневою функцією чи показниковою, то формули відповідно мають вигляд $y = a_0 x^{b_0}$, $y = a_0 e^{b_0 x}$.

Вигляд формули може бути відомий заздалегідь з будь-яких теоретичних міркувань, вибраний з міркувань простоти аналітичного подання емпіричного матеріалу або в результаті аналізу отриманих графіків. Так, для вибору між степеневою або показниковою функціями експериментальні точки необхідно нанести на графік у логарифмічних або напівлогарифмічних координатах. Якщо точки добре лягають на пряму в подвійних логарифмічних координатах, це означає, що залежність між y і x описується степеневою функцією; якщо отримуємо пряму лінію в напівлогарифмічних координатах, необхідно використовувати для опису залежності між y і x показникову функцію. Після встановлення виду емпіричної формули задача зводиться до визначення параметрів a_0, b_0, \dots , що входять до неї, і т.д.

У загальному вигляді обрана функціональна залежність може бути представлена в такий спосіб;

$$y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_n), \quad (6.15)$$

де a_0, a_1, \dots, a_n – параметри, які слід визначити.

Значення цих параметрів не можна точно визначити за емпіричними значеннями функції y_1, y_2, \dots, y_k , оскільки останні містять випадкові похибки. Наявність випадкових похибок вимірювань практично виключає можливість

підбору такої формули (6.15), яка точно описувала б всі дослідні значення, і робить його недоцільним.

Графік шуканої функції не повинен проходити через всі експериментальні точки, він повинен займати якесь оптимальне положення. Основним методом, який використовується для згладжування розкиду експериментальних результатів та визначення параметрів a_0, a_1, \dots, a_n обраної функціональної залежності, є метод найменших квадратів. Основна ідея цього методу полягає в тому, що значення параметрів розрахункової залежності (6.15) повинні бути такими, щоб сума квадратів відхилень вимірених значень від розрахованих по залежності (6.15), а саме:

$$S = \sum_{k=1}^N [y_k - f(x_k; a_0, a_1, \dots, a_n)]^2 \quad (6.16)$$

була б мінімальною.

У поданому вигляді співвідношення (6.16) справедливе, якщо виміри є рівноточними; для нерівноточних вимірювань необхідно враховувати так само, як і у співвідношеннях (6.13) та (6.14), вагу вимірювань.

Метод найменших квадратів може використовуватися тільки в тому випадку, якщо виміри значень функції y_1, y_2, \dots, y_N виконані незалежно один від одного і якщо похибки вимірів відповідають нормальному закону розподілу ймовірностей.

Методика застосування методу найменших квадратів розглянута у роботі [39] на найпростішому прикладі визначення параметрів лінійної функції, яка графічно зображується прямою лінією. Така лінія в цьому випадку завжди проходить через точку (\bar{x}, \bar{y}) , координати якої є середніми значеннями координат даних точок, що обчислюються в загальному випадку за формулами, аналогічними (6.13). При цьому рівняння прямої лінії має вигляд

$$y - \bar{y} = a_0(x - \bar{x}), \quad (6.17)$$

а параметр a_0 визначається за формулою

$$a_0 = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}, \quad (6.18)$$

де

$$\bar{x}^2 = \frac{\sum x_k^2 p_k}{\sum p_k}, \quad \bar{x}\bar{y} = \frac{\sum x_k^2 y_k p_k}{\sum p_k}. \quad (6.19)$$

Якщо виміри робляться з однаковою точністю, всі вагові коефіцієнти вимірів $p_k = 1$ то формули (6.18) і (6.19) істотно спростяться.

Для функцій іншого вигляду процедура використання методу найменших квадратів зазвичай ускладнюється. Якщо параметри входять у емпіричну формулу нелінійно, визначення їх методом найменших квадратів зазвичай пов'язані з громіздкими обчисленнями. У таких випадках задачу намагаються звести до лінійного варіанту за рахунок перетворення емпіричних формул або шляхом введення поправок до наближених параметрів, для чого застосовуються різні спрощені методи.

При вивченні нелінійних залежностей між величинами, що зазнають випадкового розсіювання, дуже ефективним є застосування методів регресивного аналізу. Регресивний аналіз дозволяє ефективно ідентифікувати усереднений закон поведінки кожної із величин залежно від значень іншої величини. При зіставленні кожного значення однієї величини із середнім із відповідних значень іншої величини отримують функцію регресії. Залежно від того, які середні значення використовуються – теоретичні (математичне очікування) чи емпіричні (середні арифметичні з результатів експерименту) використовують методи теоретичної або емпіричної регресії.

Функцію регресії прийнято зображати графічно лінією регресії. На рис. 6.4 показана лінія регресії y і x , що представляє істотно нелінійну залежність між величинами, встановлену в процесі експерименту при випадковому розсіюванні результатів.

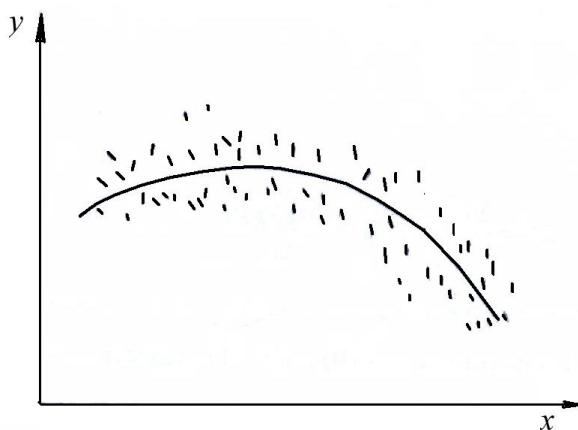


Рис. 6.4 Лінія регресії

Міру залежності між такими величинами при неконтрольованому розкиді прийнято характеризувати коефіцієнтом кореляції чи кореляційними залежностями.

У загальному випадку коефіцієнтом кореляції ρ між випадковими величинами x і y називають математичне очікування добутку їх нормованих відхилень:

$$\rho = M\left(\frac{x-a}{\sigma_x} \cdot \frac{y-b}{\sigma_y}\right), \quad (6.20)$$

де $a = Mx$ і $b = My$ – центри розподілу величин x і y , а σ_x^2 і σ_y^2 – їх дисперсії.

Коефіцієнт кореляції є безрозмірною величиною і його абсолютна величина не перевищує 1: $\rho \leq 1$.

Якщо величини x і y незалежні, то коефіцієнт кореляції дорівнює нулю. Якщо ці величини є залежними, але не корелюють, то коефіцієнт кореляції дорівнює чи близький до нуля. При цьому рівність коефіцієнта кореляції нулю означає відсутність лінійної залежності.

Рівність $|\rho|=1$ означає наявність лінійної функціональної залежності між величинами x і y , і в цьому випадку кожному значення однієї величини відповідає одне значення іншої величини. Очевидно, що чим ближче $|\rho|$ до 1, тим ближче залежність між величинами до детермінованої лінійної.

Зазначимо, що побудова кривих регресії, зазвичай, здійснюється шляхом методу найменших квадратів. При цьому найчастіше обмежуються параболічними залежностями невисокого порядку, обробляючи які визначають коефіцієнти кореляції та конкретизують вид співвідношень, що описують взаємозв'язок між залежними величинами [39].

Лекція 27. Характеристики точності і похибки вимірювання. Визначення середніх значень вимірюваних величин. Клас точності вимірювальних приладів. Обробка результатів експериментів

Контрольні запитання за розділом 6

1. Чинники, що впливають на точність вимірювання.
2. Дати класифікацію помилок при вимірюваннях та їх джерела.
3. Як формується гістограма результатів вимірів?
4. Що таке нормальний закон розподілу помилок вимірів?
5. Які основні показники, що характеризують точність вимірювань?
6. Які бувають характеристики точності вимірювальних приладів що вони означають?
7. Як визначаються середні значення вимірюваних величин?
8. Якими функціональними залежностями апроксимують експериментальні дані, та які методи для цього використовують?
9. Що таке метод найменших квадратів його головна ідея та практичне застосування.
10. Коли застосовують регресійний аналіз, його особливості?

Посилання

1. *Бореймагорская Л.А., Воронюк В.Г., Назаренко А.Ф.* Некоторые области использования стержневых жидкоструйных излучателей для исследования усталостной прочности материалов. – В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев: Наук. думка, 1977. – С. 229-232.
2. *Борздыка А.М.* Методы горячих механических испытаний металлов. –М.: Металлургиздат, 1962.- 488 с.
3. *Борздыка А. М., Гецов Л. Б.* Релаксация напряжений в металлах и сплавах. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с.
4. *Вейбулл В.* Усталостные испытания и анализ их результатов.- М.: Машиностроение, 1964. – 276 с.
5. *Волощенко А.П., Алексюк М.М., Гришко В.Г. и др.* Испытательная техника для исследования механических свойств материалов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 319 с.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы: Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.75
7. ГОСТ 22706-77. Металлы: Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269 °С. – Введ. 01.01.79.
8. ГОСТ 22848-77. Металлы: Метод испытания на ударный изгиб при температурах от минус 100 до минус 269 °С. – Введ. 01.01.82.
9. ГОСТ 9454-78. Металлы: Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатных и повышенных температурах. – Введ. 01.01.79.
10. ГОСТ 23.026-78. Металлы: Метод испытания на многоцикловую и малоцикловую усталость.– Введ. 01.01.79.
11. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении: Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.– Введ. 01.01.81.
12. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность: Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введ. 01.07.81.
13. ГОСТ 25.503-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на сжатие.– Введ. 01.07.81.
14. ГОСТ 3565-58. Металлы. Метод испытаний на кручение. – Введ. 001.01.1959.
15. ГОСТ 10145–81. Металлы: Метод испытания на длительную прочность. – Введ. 01.07.82.
16. ДСТУ ISO 204:2019 Металеві матеріали. Одноосьове випробування на повзучість розтягуванням. Метод випробування.- Введ.01.01.20
17. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86.
18. *Давиденков Н. Н.* Избранные труды : В 2-х т. – Киев: Наук.думка, 1981. – Т.1. Динамическая прочность и хрупкость металлов. 704 с.
19. ДСТУ 4347:2004. Метали. Методи визначення характеристик пружності в умовах криогенних, знижених і кімнатної температур. –Чинний від 2006.01.01.
20. ДСТУ 7305:2013. Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур. – Чинний від 2014.01.01.
21. *Испытание металлов:* Справочник. Пер. с нем./ Под. ред. Х. Блюменауэра.– М. : Металлургия, 1979.– 448 с.
22. *Испытательная техника:* Справочник. В 2-х кн./Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. 528 с.

23. *Испытательная техника*: Справочник. В 2-х кн./Под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1982.- Кн. 2. 560 с.
24. *Касаткин Б. С, Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справоч. Пособие. – Киев: Наук. думка, 1981.- 584 с.
25. *Кузьменко В.А., Матохнюк Л.Е., Писаренко Г.Г. и др.* Усталостные испытания на высоких частотах нагружения.– Киев: Наук.думка, 1979. – 336 с.
26. *Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д.* Автоматизация экспериментальных исследований.– М. : Наука, 1983.– 392 с.
27. *Лебедев А. А.* Методы, механических испытаний материалов при сложном напряженном состоянии.- Киев: Наук. думка, 1976.- 148 с.
28. *Лепин Г. Ф., Гаврилова Т.Ф., Белькович А.С. и др.* Экспериментально-расчетная методика определения характеристик ползучести материалов на основе исследования релаксации изгибающего момента.– В кн.: 1 симпоз. «Ползучесть материалов». – Белосток, 1983. – С. 149 - 155.
29. *Малашенко С.В., Чекин О.Н., Дышель М.Ш. и др.* Исследование материалов и элементов конструкций пневматическими измерителями.- Киев: Наук. думка, 1983.- 160 с.
30. *Нотт Дж.Ф.* Основы механики разрушения. Пер с англ. М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
31. *Осасюк В. В.* Установка для исследования релаксационной стойкости жаропрочных материалов при сложном напряженном состоянии. – В кн.: Вопросы высокотемпературной прочности в машиностроении. Киев : Изд-во АН УССР, 1963. – С. 116-120.
32. *Панских В.К., Пригоровский Н.И.* Метод хрупких тензо-чувствительных покрытий. – В кн.: Экспериментальные исследования и расчет напряжений в конструкциях. М. : Наука, 1975. – С. 3-18.
33. *Писаренко Г. С, Эскин Э. А.* Исследование несущей способности образцов и конструктивных элементов покрытий, работающих в условиях совмещенного радиационного и конвективного нагрева. – В кн.: Исследование материалов в условиях лучистого нагрева. Киев: Наук. думка, 1975. – С. 120-135.
34. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях*: В 2-х т./ Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев : Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.
35. *Прочность материалов и элементов конструкция в экстремальных условиях*: В 2-х т. / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев : Наук. думка, 1980. –Т. 2. – 771 с.
36. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. –752 с.
37. *РД 50-260-81.* Методические указания: Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. – Введ. 08.07.82.
38. *Рид Р. П., Дюрчоль Р. Л.* Криостат и измерение деформации в процессе испытаний на растяжение при температурах до 1,5 К. – В кн.: Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: Пер. с англ./ Под ред. И. И. Фридляндера. М.: Металлургия, 1983. – С. 384-389.
39. *Румишский Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное руководство. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
40. *Сегал В.М., Макушок Е.М., Резников В.И.* Исследование пластического формоизменения методом муара. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
41. *Серенсен С. В., Гарф М. Э., Кузьменко В.А.* Динамика машин для испытаний на усталость. – М.: Машиностроение, 1967. – 460 с,
42. *Серьезнов А.Н.* Измерения при испытаниях авиационных конструкций. – М. : Машиностроение, 1976. – 224 с.

43. *Степанов Г.В.* Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. – Киев: Наук.думка, 1979. – 268 с.
44. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев : Наук. думка, 1978. – 238 с.
45. *Сугавара Х.* Тензодатчики и их применение. – Коацу гасу, 1975, **12**, № 5. – С. 31-38.
46. *А.Г.Андрєєв, Г.І.Львов, О.В.Щепкін.* Тензометрія: підручник. – Харків: НТУ «ХПІ», 1917.- 232с.
47. *Томашевский Э. Е., Слуцкер А. И.* Устройство для поддержания постоянного напряжения в одноосно растягивающемся образце. – Завод. лаб., 1963, **29**, № 8. – С. 994-995.
48. *Третьяченко Г. Н.* Моделирование при изучении прочности конструкций. – Киев : Наук. думка, 1979. – 232 с.
49. *Трофимов А.И.* Пьезоэлектрические измерительные преобразователи в атомной технике.- М. : Энергоатомиздат, 1983.- 64 с.
50. *Троценко В. Т.* Прочность материалов при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1978. – 176 с.
51. *Троценко В.Т., Грязнов Б.А., Стрижало В.А и др.* Методы исследования сопротивления металлов деформированию и разрушению при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1974. – 256 с.
52. *Шенк Х.* Теория инженерного эксперимента.- М.: Мир, 1972.- 381 с.
53. *Шнейдерович Р. М., Левин О. А., Махутов Н. А., Новопашин М.Д.* Методы измерения полей циклических упругопластических деформаций. – Завод. лаб., 1972, **38**, № 10. – С. 1246-1252.
54. *Шнейдерович Р.М., Махутов Н.А.* Современные электро-гидравлические машины для механических испытаний материалов: Там же. – 1974, **40**, № 12. – С. 1530-1537.
55. Экспериментальная механика: в 2-х книгах. Пер. с англ./ Под ред. Кобаяси А. – М.: Мир, 1990. – Кн. 1. 616 с.
56. Экспериментальная механика: в 2-х книгах. Пер. с англ./ Под ред. Кобаяси А. – М.: Мир, 1990. – Кн. 2. 552 с.
57. *Бородій М.В.* До розробки деформаційного критерію малоциклової втоми. Проблеми міцності. – 2001. №3. – С. 28 – 37.
58. *Бородій М.В., Адамчук М.П., Стрижало В.О.* Конкретизація параметрів експоненціального ядра спадковості ендохонної теорії при опису ратчетингу за двовісного навантаження. Проблеми міцності. – 2018. №4. – С. 156 – 167.
59. *Адамчук М.П., Бородій М.В., Стрижало В.О., Ясковець З.С., Скакун С.А.* Циклічна повзучість труб за блочного навантаження внутрішнім тиском. Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2022. 58. №2. С. 87 – 94.
60. *Засименко В. М.* Основи теорії планування експерименту :Навчальний посібник для студентів напрямку "Метрологія, стандартизація і сертифікація" /Державний ун-т "Львівська політехніка". – Львів :Видавництво ДУ "Львівська політехніка",2000. – 204с.
61. *Богданов В. Л.* Основи експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла :навчальний посібник /В.Л. Богданов, Я.О. Жук, О.С. Богданова; Національна академія наук України/ – Київ :Академперіодика, 2016. – 278 с.

Електронне мережне видання

Стрижало Володимир Олександрович
Бородій Михайло Васильович

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ В МЕХАНІЦІ
ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
Київ – 2022