

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний аграрний університет

**Й. Й. Лучко**

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ  
БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

**RESEARCH AND TESTING METHODS OF BUILDING  
MATERIALS AND STRUCTURES**

**Друге видання, перероблене і доповнене.**

**За редакцією д-ра тех. наук, професора Й. Й. Лучка**

Львів  
Видавництво “Левада”  
2020

Друкується за постановою Вченої ради Львівського національного аграрного університету (протокол № 1 від 31.08.2020 р.)

Рецензенти:

**В. М. Карпюк**, д-р тех. наук, професор кафедри “Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд” (Одеська державна академія будівництва та архітектури);  
**М. Г. Мар’єнков**, д-р тех. наук, с.н.с, завідувач відділу автоматизації досліджень та сейсмостійкості будівель та споруд (Державне підприємство “Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій”) **П. О. Марущак**, д-р тех. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництва (Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя);  
**С. Р. Слободянюк**, д-р тех. наук, професор, кафедри будівельної механіки та опору матеріалів (Придніпровська академія будівництва та архітектури).

У монографії викладено методи та засоби проведення експериментальних досліджень. Розглянуто неруйнівні методи контролю випробувань будівельних конструкцій. Наведені конструкції створених універсальних стендів і стендів контролю якості залізобетонних виробів. Представлено давачі тиску, деформації та нові типи багатофункціональних сенсорів магнітного поля і температури. Описано способи та методи обстеження і випробування матеріалів, конструкцій та споруд. Визначено основні фізико-механічні характеристики будівельних матеріалів, зокрема тріщиностійкості бетонів. Значну увагу приділено методам теорії ймовірності та математичній статистиці. Наведено методи та прийоми фізичного, технічного та математичного моделювання будівельних конструкцій за допомогою електронних і аналогових обчислювальних машин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників, проектувальників, будівельників та експлуатаційників. Книга буде корисною і для викладачів та студентів будівельних спеціальностей.

The monograph describes the methods and means of conducting experimental research. Non-destructive methods of testing building constructions are considered. Designs of the created universal stands and stands of quality control of reinforced concrete products are resulted. Pressure, deformation and new types of multifunctional magnetic field and temperature sensors are presented. Inspection and testing ways and methods of materials, structures and structures are described. The main physical and mechanical characteristics of building materials, in particular crack resistance of concrete, are determined. Considerable attention is paid to the methods of probability theory and mathematical statistics. Methods and techniques of physical, technical and mathematical modeling of building structures with using electronic and analog computers are given.

For scientists, engineers, designers, builders and operators. The book will be useful for teachers and students of construction specialties.

## Передмова

Створення будівель і споруд – благородна, але надзвичайно відповідальна справа. З розвитком суспільства ускладнюються завдання, які постають перед будівельниками. Сучасні проекти сміливі за своїми технічними рішеннями: зводяться все вищі будівлі, зростають прогони споруд, стають меншими перерізи елементів конструкцій, використовуються матеріали з новими характеристиками. Водночас в Україні багато комплексів унікальних історичних ансамблів, окремих будівель – пам'яток історії та архітектури, які потребують проектних та будівельних робіт для продовження терміну їх експлуатації. Значно збільшились в останні роки об'єми реконструкції, ремонтів та перебудови. Важко визначити напружено-деформований стан будівельних конструкцій під дією комплексу силових навантажень і впливів: постійних і тимчасових, динамічних і сейсмічних навантажень, агресивного середовища і т. п.

Попри важливість зовнішнього вигляду, естетичності сприйняття, функціональності внутрішнього оздоблення найважливішими вимогами до будівель і споруд є їх надійність і довговічність. Забезпечення цих вимог досягається на різних стадіях створення будівель і споруд: як під час проектування, виготовлення виробів і конструкцій, будівництва, реконструкції і ремонту, так і під час експлуатації. Але лише теоретичних підходів та аналітичних методів для забезпечення головних вимог не достатньо, це можливо лише за наявності достовірної інформації про реальний стан та дійсну роботу будівельних конструкцій, а також фактичні характеристики їх матеріалів.

Важливо усвідомити, що саме поєднання теоретичних розробок та експериментальних досліджень і випробувань дає можливість забезпечити сучасний підхід до удосконалення існуючих та розробки нових архітектурних форм, конструктивних елементів і матеріалів. Поглиблене вивчення роботи конструкцій і споруд дає змогу побудувати розрахункові моделі, що повніше відображають їх напружено-деформований стан. Створити моделі можна тільки під час глибокого аналізу і вивчення поведінки реальних об'єктів.

Основою вивчення роботи будівельних конструкцій є експеримент, а фізико-механічні характеристики матеріалів одержують у результаті випробувань. Гарантією достовірності результатів досліджень та випробувань є дотримання визначених вимог до метрологічного забезпечення експерименту.

Особливого значення в сучасній будівельній науці набуває впровадження досягнень фундаментальних наук, зокрема, для об-

грунтування результатів експерименту сьогодні набуває особливого значення. Тому в книзі викладено відомості про необхідність удосконалення сучасних методів розрахунку будівельних конструкцій і матеріалів, що обумовлено впровадженням у практику нових досліджень методів механіки руйнування, теорії ймовірності, надійності, математичної статистики, а також вказано на значно більші можливості використання електронно-обчислювальної техніки, для аналізу і обробки результатів досліджень.

Без експериментальної інформації, зібраної й опрацьованої відповідно до вимог математичної статистики, неможливий успішний розвиток теоретичних методів. Тому зростають вимоги до точності й однозначності вимірювання фізичних величин, які характеризують властивості та стан будівельних матеріалів, конструкцій будівель і споруд на всіх технологічних стадіях: проектування, виготовлення, транспортування, монтажу, експлуатації та реконструкції.

На цих етапах велике значення має обстеження і випробування конструкцій, за результатами яких проектувальник робить висновки про міцність матеріалів і напружено-деформований стан елементів будівель і споруд. Під час виготовлення виробів здійснюється інструментальний контроль якості, який дає змогу суттєво підвищити їх надійність. Методи випробування дають можливість виявити ті додаткові зміни стану конструкції, які виникають під час транспортування. На стадії монтажу і приймання в експлуатацію готових будівель і споруд об'єктивну інформацію про їх стан можна отримати, використовуючи сучасну вимірювальну техніку. У процесі експлуатації і реконструкції будівель і споруд необхідно їх досліджувати за допомогою сучасної апаратури.

У цій книзі описано методи та засоби експериментального дослідження технічного стану різних будівельних об'єктів і матеріалів. Викладений матеріал базується на знаннях, отриманих дослідниками в галузі математики та фізики, будівельних матеріалів, опору матеріалів, будівельної механіки і механіки руйнування, зокрема, автором який більше 40 років випробовував і досліджував будівельні конструкції. Використані також підручники з проектування конструкцій: металевих, залізобетонних, кам'яних, з деревини та пластмас, які наведені у списку використаної літератури.

Структурно монографія “Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів і конструкцій” складається з передмови, чотирнадцяти розділів, загальних висновків та списку літературних джерел.

У **першому розділі** “Дослідження та випробування матеріалів, конструкцій будівель і споруд” сформульовано мету та основні завдання досліджень і випробування конструкцій будівель і споруд. Розглянуто і описано сучасні методи обстеження та випробування матеріалів, конструкцій будівель та споруд. Описано метрологічне забезпечення експерименту і стандартизацію вимірювань та наведено основні засади і поняття метрології експериментальних досліджень, основні положення про оцінку надійності конструкцій будівель і споруд. Також наведено історичний нарис розвитку методів досліджень та випробувань.

У **другому розділі** “Дослідження та засоби їх проведення” розглянуто способи випробувань конструкцій. Силові дії та створення статичних і динамічних навантажень. Описано вимірювальні прилади та основні схеми для статичних і динамічних випробувань.

У **третьому розділі** “Неруйнівні методи випробування будівельних матеріалів та конструкцій”, представлено результати досліджень фізико-механічних характеристик матеріалів, схему класифікації та схему комбінованих неруйнівних методів. Розглянуто механічні методи визначення поверхневої твердості, – методи: відскоку, відбитку та висмикування і відриву та акустичні методи: резонансний, ультразвуковий, ударний та метод акустичної емісії. Також наведено дані про радіаційні та проникальної радіації методи, гамма випромінювання та радіографічний, радіоскопічний і радіометричний способи та метод швидких нейтронів. Описано магнітні та електромагнітні, оптичні та інші методи неруйнівного контролю.

У **четвертому розділі** “Обладнання для випробування”, наведено загальні відомості про обладнання. Описано конструкцію розробленого універсального стенду для випробування балкових залізобетонних конструкцій та конструкцію стенду для випробування стінових панелей СВСП-1. Представлено також конструкцію та функціональні схеми контролю якості довгомірних залізобетонних виробів, зокрема СНК-1, СНК-2, СНК-3, СНК-4. Розроблено установку для підбору оптимальних режимів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів. Описано автоматизований стенд для випробування залізобетонних конструкцій та нестандартне обладнання – конструкцію силової плити.

У **п'ятому розділі** “Давачі тиску та деформації в будівельних конструкціях та спорудах”, описано розроблені нові типи багатофункціональних різних сенсорів для вимірювання магнітного поля і температури в окремих сенсорах вологості і точки роси. Описано конс-

трукцію пристроїв для досліджень тензорезистивних давачів вимірювання деформацій, побудованих з ниткоподібних кристалів. Описано нові типи тензорезистивних давачів з напівпровідникових ниткоподібних кристалів. Також розроблені ємнісні давачі для вимірювання тиску та деформації в залізобетонних конструкціях будівель і споруд. Виконано та описано застосування напівпровідникових тензорезисторних давачів для дослідження фізико-механічних характеристик бетонів з добавкою цеолітового порошку.

У **шостому розділі** “Експериментальні методи дослідження росту тріщин”, у загальних відомостях сформульовано беручи до уваги експериментальну механіку руйнування (ЕМР) та беручи за основу вид фізичного поля або речовину можна класифікувати всі методи вимірювання тріщини і розділити їх на дев’ять груп, для кожної з яких характерна взаємодія тріщин з певним фізичним полем у будь-якому її стані. Нижче ці групи і досліджуються зокрема, такими методами: пружної податливості; ультразвуковий; різниці електричних потенціалів; акустичної емісії; оптичні; вихрових струмів; магнітні; сигнальних давачів та фрактографічні методи. Описано також спосіб вимірювання розкриття та довжини тріщин у залізобетонних конструкціях.

У **сьомому розділі** “Фізико-механічні характеристики бетону, залізобетону та інших будівельних матеріалів”, досліджено зразки і способи їх виготовлення та фізико-механічні характеристики бетону. Розглянуто і описано обладнання, прилади та засоби для досліджень зразків. Зокрема, підготовка зразків до випробувань, проведення випробувань, визначення деформації усадки бетону та деформації післядії. Описано обробку результатів випробувань і визначення міцнісних, деформаційних і структурно-механічних характеристик бетону. Досліджено і визначено довговічність армоцементу в агресивному та неагресивному середовищах за всіма методами корозійної стійкості. Також визначено та описано механічні характеристики арматурної сталі механічних характеристик цегли керамічної і механічних характеристик деревини.

У **восьмому розділі** “Визначення характеристик тріщиностійкості бетонів”, розроблено методичні рекомендації на засадах механіки руйнування де, зокрема, сформульовано мету розробки, завдання та досліджено їх науковий рівень. Розглянуто та сформульовано загальні положення та описано стандартизовані зразки для досліджень характеристик тріщиностійкості бетону. Розроблено і описано обладнання, проведення випробувань та обробка результа-

тів досліджень. Встановлено відповідні залежності для визначення  $K_{IC}$ ,  $f_{ref}$ , та  $E_c$  під час рівноважних випробувань. Також розроблено рекомендації на випробування зразків під час одночасного розтягу і закруту та сформульовано пропозиції для випробування бетону на кліматичну тріщиностійкість (морозостійкість). Розроблено експериментальну методику знаходження довжини тріщини та деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів.

У **дев'ятому розділі** “Довготривалі дослідження будівельних конструкцій, основ і фундаментів”, де сформульовано основні вимоги до натурних обстежень і довготривалих випробувань будівель і споруд та описано фотопружні та магнітопружні давачі і наведено методику спостереження за тріщинами. Розглянуто обстеження, дослідження та випробування основ і фундаментів, описано способи вимірювання навантажень під час довготривалих випробувань. Представлено також вимірювання тисків і напружень у ґрунтах за допомогою месдоз. Наведено способи вимірювання деформацій і фільтрації ґрунтів основи. Описано геофізичні методи контролю основ і фундаментів, та найчастіше застосовувані методи вимірювання щільності ґрунтів, метод розсіяного  $\gamma$  – випромінювання, нейтронний метод.

У **десятому розділі** “Дослідження конструкцій мостів”, розглянуто обстеження мостів по етапах та встановлені періодичні огляди двох видів після паводків і післяремонтні, та детально описані умови оглядів. Наведено методику статичних випробувань мостів та встановлені схеми випробувань I-III, схеми установки навантаження і прогиномірів, тензорезисторів на елементах прогонових будов мостів. Встановлено мету і задачі динамічних випробувань мостів, зокрема розглянуто горизонтальну дію на міст автомобілем та застосування вібраційних машин для випробування. Детально описано обробку й аналіз результатів обстеження та випробування і залежностей для оцінки НДС. Представлено основні види віброграм та описано дослідження мостів у лабораторіях і випробування мостів з руйнуванням конструкцій.

У **одинадцятому розділі** “Методи дослідження теорії ймовірності та математичної статистики”, де розглянуто характеристики випадкових величин та сформульовано теорію ймовірності, дискретної випадкової величини, закони розподілу ймовірності дискретної випадкової величини. Наведено гістограму і графік кривої розподілу. Конструювати апарат математичної статистики дуже складно і тому гістограму заміняють неперервною кривою, яка описується за відповідними законами. Наведено ряд теоретичних законів розподі-

лу та відповідних залежностей які їх описують. Наведено також дискретні розподіли випадкових величин розподіл Пуассона, біноміальний та геометричний розподіл.

**У дванадцятому розділі** “Теорія математичного планування експерименту, кореляційно-регресивний аналіз та критерії узгодженості”, де розглянуто загальні поняття теорії математичного планування експерименту, умови і результати проведення дослідів і методики планування експерименту, план відсіюючих експериментів, типовий план експерименту. Наведено основні залежності, – поліноми (КРА) та термінологію визначення параметрів (КРА). Описано основні критерії узгодженості з алгоритмом їх застосування, це критерії Пірсона, Колмагорова, Фішера і Стюдента.

**У тринадцятому розділі** “Методи моделювання та аналіз систем”, розглянуто і описано суть методів моделювання й галузь їх використання та наведено найбільш широко розповсюджені моделі, – це функціональні, економічні та інформаційно-процедурні. Розрізняють два види моделей детерміновану і недетерміновану та описано технічне моделювання під час вибору конструкцій споруди. Показано, що математичні моделі найбільш універсальні які дають змогу виконувати моделювання на ПК. Описано метод статистичних випробувань або як його називають метод Монте-Карло та проілюстровано його на прикладі. Сформульовано основні етапи побудови моделі та формування її задуму представлено блок схему основних етапів моделювання. Розглянуто реалізацію моделі та результати моделювання і способи одержання на ПК псевдовипадкових чисел із заданим законом розподілу.

**У чотирнадцятому розділі** “Моделювання будівельних конструкцій”, наведено загальні положення та класифікацію методів моделювання будівельних конструкцій. Метод моделювання для будівельних конструкцій є одним із найбільш раціональних, зручний і доступний для дослідів і спостережень. Сформульовано умови розрахункових схем будівель і споруд. Описано основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій. Наведено відомості про теорію подібності та розмірності фізичного моделювання будівельних конструкцій. Розглянуто техніку і специфіку виготовлення фізичних моделей конструкцій будівель і споруд. Описано модельні фізичні дослідження і приведено розроблену структурну блок-схему моделювання будівельних конструкцій та приклади моделювання балки поляризаційно-оптичним методом.



Щира подяка рецензентам, зауваження яких мали велике значення у доведенні рукопису монографії до рівня наукового видання, яке відповідає сучасним вимогам. Автор вдячний докторам технічних наук, професорам В. М. Карпюку, М. Г. Мар'єнкову, П. О. Марущаку, С. О. Слободянюку, за слушні пропозиції та зауваження які враховано та внесено у видання.

## Preface

The construction of new buildings and structures is a noble, but extremely responsible task. With the development of society, the tasks, which builders face, become more complex. Modern projects are bold in their technical solutions: the height of buildings and ledgers of structures grow, the cross-sections of structural elements become smaller, and materials with new characteristics are used. At the same time, Ukraine has many complexes of unique historical ensembles, individual buildings-monuments of history and architecture that require design and construction work to extend their existence. In recent years, the volume of reconstruction, repairs and reconstruction have increased significantly. It is difficult to determine the stress-strain state of building structures under the influence of a complex of power loads and impacts: constant and temporary, dynamic and seismic loads, aggressive environment, etc.

Despite the importance of appearance, aesthetic perception, and functionality of interior decoration, the most important requirements for buildings and structures are their reliability and durability. These requirements are met at various stages of constructing buildings: both during design, manufacturing products and structures, construction, reconstruction and repair, and during operation. But only theoretical approaches and analytical methods are not enough to meet the main requirements. It is possible only if there is reliable information on a real state and actual operation of building structures, as well as the actual characteristics of their materials.

It is important to realize that the very combination of theoretical developments and experimental research and testing make it possible to provide a modern approach to improving the known and developing new architectural forms, structural elements, and materials. The careful studying of operating structures and buildings allows creating computational models that better reflect their stress-strain state. Models can only be created during in-depth analysis and study of the real objects' behavior.

The basis for studying building structures' operation is an experiment, and the physical and mechanical characteristics of materials are obtained because of tests. The reliability guarantee of research and test results is the observance of certain requirements for the metrological support of the experiment.

The particular importance in modern construction science is the introduction of Fundamental Sciences achievements, in particular, the experiment today is of particular importance to substantiate the results of the experiment. Therefore, the book contains the information about the

need to improve modern methods of calculating building structures and materials, which is due to the introduction into practice of new research methods of fracture mechanics, probability theory, reliability, mathematical statistics, and indicates much greater opportunities for using electronic computing technology to analyze and process research results.

Without the experimental information collected and processed in accordance with the requirements of Mathematical Statistics, the successful development of theoretical methods is impossible. Therefore, the requirements for accuracy and unambiguity of measuring physical quantities that characterize the properties and condition of building materials, building structures and structures at all technological stages: design, manufacture, transportation, installation, operation and reconstruction are increasing.

At these stages inspection and testing of structures are of great importance, according to their results the designer makes a conclusion about the strength of materials and the stress-strain state of buildings and structures' elements. During the manufacture of products, instrumental quality control is carried out, which significantly increases their reliability. Testing methods make it possible to identify those additional changes in the structure state that occur during transportation. At the stage of installing and commissioning finished buildings and structures, objective information about their condition can be obtained using modern measuring equipment. During the operation and reconstruction of buildings and structures, it is necessary to examine them using modern equipment.

This textbook describes methods and tools for experimental researching the technical condition of various construction objects and materials. The described material is based on the knowledge obtained by researchers in mathematics and physics, building materials, resistance of materials, structural mechanics and fracture mechanics, in particular, by the author who tested and studied building structures over 40 years. The textbooks on designing metal, reinforced concrete, stone, wooden and plastic structures listed in the references are also used.

The monograph “Research and testing methods of building materials structures” consists of a preface, fourteen chapters, and references.

**In chapter one** “Research and testing building materials, buildings structures and structures,” the purpose and main tasks of researching and testing buildings structures and structures are formulated. Modern methods of inspecting and testing materials, buildings structures, and structures are considered and described. The metrological support of the experiment and the standardization of measurements are described, and the

basic principles and concepts of metrology of experimental research, the main provisions on the assessment of buildings structures and structures reliability are given. A historical outline of developing research and testing methods is also provided.

In **chapter two** “Research and means of their making” the methods of testing structures are considered. Forceful actions and creation of static and dynamic loads, measuring devices and basic schemes for static and dynamic tests are described.

In **chapter three** “Non-destructive methods of testing building materials and structures,” the research results of the physical and mechanical characteristics of materials, the classification scheme, and the scheme of combined non-destructive methods are presented. Mechanical methods of determining the surface hardness such as: rebound, imprint, pull and tear, as well as acoustic methods such as: resonant, ultrasonic, shock and acoustic emission method are considered. The data on radiation and penetrating radiation methods, gamma radiation and radiographic, radiosopic and radiometric methods and the fast neutron method are also provided. Magnetic and electromagnetic, optical and other non-destructive testing methods are described.

In **chapter four** “Testing equipment,” the general information on the equipment is provided. The design of the developed universal stand for testing reinforced concrete beam structures and the design of the stand for testing wall panels SVSP-1 are described. The design and functional schemes of quality control of long-length reinforced concrete products, in particular, SNK-1, SNK-2, SNK-3, SNK-4 are also shown. An installation for selecting optimal modes of heat treatment of concrete and reinforced concrete products has been developed. An automated stand for testing reinforced concrete structures and non-standard equipment – the structure of a load-bearing plate – are described.

In **chapter five** “Pressure and deformation sensors in building structures and structures,” the new types of multifunctional different sensors have been developed for measuring the magnetic field and temperature in separate moisture and dew point sensors. The design of devices for studying strain-resistant strain sensors constructed from filamentous crystals is described. New types of strain-resistive sensors made of semiconductor filamentous crystals are described. Capacitive sensors for measuring pressure and deformation in reinforced concrete structures of buildings and structures are also developed. Application of semiconductor strain-gage sensors for studying the physical and mechanical characteristics of concrete with the addition of zeolite powder is per-

formed and described.

In **chapter six** “Experimental methods for studying crack growth,” they are stated in general terms, taking into account the experimental fracture mechanics (EMR), and, as a basis, the type of physical field or substance. It is possible to classify all the methods of measuring cracks and divide them into nine groups, each of which is characterized by the interaction of cracks with a specific physical field in any conditions. Below, these groups are investigated in particular by the following methods: elastic compliance; ultrasonic; electric potential difference; acoustic emission; optical; eddy currents; magnetic; signal sensors and fractographic methods. A method for measuring the opening and length of cracks in reinforced concrete structures is also described.

In **chapter seven** “Physical and mechanical characteristics of concrete, reinforced concrete and other building materials,” the samples and methods of their manufacture and physical and mechanical characteristics of concrete are studied. The equipment, devices and means for researching the samples, In particular, the preparation of samples for testing, determining concrete shrinkage deformation and deformation after action are considered and described. The processing of test results and determining strength, deformation and structural-mechanical characteristics of concrete are described. The durability of reinforced cement in aggressive and non-aggressive environments is studied and determined, using all methods of corrosion resistance. The mechanical characteristics of reinforcing steel, the mechanical characteristics of ceramic bricks, and the mechanical characteristics of wood are also determined and described.

In **chapter eight** “Determining the characteristics of concrete crack resistance,” the methodological recommendations based on fracture mechanics have been developed where, in particular, the goals of their development, tasks are formulated, and their level is investigated. The general provisions are considered and formulated, and the standardized samples for studying the characteristics of concrete crack resistance are described. Equipment testing and processing the research results has been developed and described. The corresponding dependencies for determining  $K_{IC}$ ,  $f_{ref}$ , and  $E_c$  during equilibrium tests are established. In addition, the recommendations were developed for testing the samples with simultaneous tension and bends, and the proposals were formulated for testing concrete for climatic crack resistance (frost resistance). The experimental method for finding the crack length and deformation characteristics of concrete crack resistance has been developed.

In **chapter nine** “Long-term studies of building structures, substructures and foundation,” the basic requirements for as-build surveys and long-term testing buildings and structures are formulated, and photoelastic and magnetoelastic sensors are described and a method of observing cracks is provided. Surveys, studies, and tests of substructures and foundations are considered, and methods of measuring loads during long-term tests are described. In addition, the measurement of pressures and stresses in soils using Mendoza is presented. Methods of measuring deformations and filtration of base soils are given. The geophysical methods of monitoring substructures and foundations and the most commonly used methods of measuring soil density, the method of scattered gamma radiation, and the neutron method are described.

In **chapter ten** “Studying bridge structures,” the studies of bridges by stages are considered and the periodic surveys of two types after floods and after repairs are established and the conditions of studying are described in detail. The method of static testing of bridges is presented and test schemes of I-III of the load setting and deflection meters, strain gauges on the elements of bridge spans are given. The purpose and objectives of dynamic testing bridges are established, in particular, the horizontal action on the bridge with a car and the use of vibration machines for testing are considered. Processing and analyzing the results of survey and testing and dependencies to assess the stress-strain state are described in detail. The main types of vibrograms are presented and the research of bridges in laboratories and tests of bridges with structural destruction are described.

In **chapter eleven** “Research methods of the probability theory and mathematical statistics,” where the characteristics of random variables are considered and the theory of probability, a discrete random variable, the laws of probability distribution of a discrete random variable are formulated. A histogram and a graph of the distribution curve are shown. It is very difficult to design the mathematical statistics apparatus, so the histogram is replaced with a continuous curve, which is described according to the corresponding laws. A number of theoretical distribution laws and corresponding dependencies describing them are given. Discrete distributions of random variables, the Poisson distribution, the binomial distribution, and the geometric distribution are also given.

In **chapter twelve** “The theory of mathematical planning analysis, correlation-regressive analysis of types and criteria of usability,” the general concepts of the theory of mathematical planning of an experiment, conditions, and results of experiments and methods of planning an

experiment, a plan of screening experiments, a typical plan of an experiment are considered. The main dependencies-polynomials (CRA) and terminology for determining parameters (CRA) are given. The main criteria of consistency with the algorithm of their application are described; they are the criteria of Pearson, Kolmagorov, Fischer, and Student.

In **chapter thirteen** “Methods of modeling and analyzing systems,” the essence of modeling methods and the area of their usage are considered and described, and the most widespread models are given - they are functional, economic, and information-procedural ones. Two types of models: deterministic and non-deterministic are distinguished, and the technical modeling is described when choosing structures. It is shown that mathematical models are the most versatile that allow performing the modeling on a PC. The method of statistical tests, or so-called the Monte Carlo method, is described and illustrated with an example. The main stages of building a model and forming its concept are formulated and a block diagram of the main stages of modeling is presented. Implementing the model and the modeling results and the methods to obtain pseudo-random numbers with a given distribution law on a PC are considered.

In **chapter fourteen** “Modeling building structures,” the general provisions and classification of methods of modeling building structures are given. The modeling method of building structures is one of the most rational, convenient, and accessible for experiments and observations. The conditions for designing schemes of buildings and structures are formulated. The main provisions of physical modeling of building structures are described. The information on the theory of similarity and dimension of physical modeling building structures is given. The technique and specifics of manufacturing physical models of buildings structures and structures are considered. Model physical studies are described and the developed structural block diagram to model building structures and samples of beam modeling with the polarization-optical method are presented.

Sincere thanks to the reviewers, whose comments were of great importance in bringing the monograph to the level of a scientific publication that meets modern requirements. The author is grateful to the doctors of technical sciences and professors V. M. Karpyuk, M. G. Maryenkov, P. O. Marushchak, S. O. Slobodyanyuk, for his sensible suggestions and comments, which are taken into account and included in the publication.

# 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

## 1.1. Мета та завдання досліджень і випробувань.

Метою експериментальних досліджень та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій є забезпечення при проектуванні, будівництві та експлуатації надійності, довговічності будівель і споруд при одночасному зниженні їх вартості та матеріалоємності.

На сьогодні проектування будівельних конструкцій з усіх видів матеріалів виконують згідно з методикою розрахунку за граничними станами. Відповідно до неї, до будь-якої конструкції чи споруди пред'явлені наступні вимоги:

- споруда в цілому, а також окремі конструктивні елементи повинні мати достатню несучу здатність (міцність, стійкість форми і розташування);

- переміщення, величини розкриття тріщин не повинні виходити за межі, що забезпечують нормальні умови експлуатації конструкції.

Потреба експериментального дослідження конструкції чи споруди обґрунтована умовністю розрахункової схеми і її відхиленням від діючої роботи конструкції; умовністю розрахункових характеристик матеріалів; впливом зовнішніх факторів, які повністю складно врахувати. Відмінність дійсної роботи конструкції чи споруди від їх теоретичної (за розрахунком) буває досить суттєвою. Тому саме випробування є засобом, який дає можливість отримати дані про відповідність реальної конструкції її теоретичній моделі. Розрахункові положення при цьому або підтверджуються, або уточнюються і вносяться корективи в розрахунок [128].

Завдання досліджень та випробувань будівельних матеріалів та конструкцій:

- забезпечення при проведенні експериментальних досліджень відповідності експлуатаційним умовам;

- встановлення відмінності дійсної розрахункової схеми дослідної конструкції від теоретичної (розрахункової) схеми;

- визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів, з яких виготовленні конструкції;

- визначення дійсної роботи складних ділянок конструкцій (наприклад, з концентраторами напружень), вузлів, стиків та іншого;

- встановлення фактичної роботи та напружено-деформованого стану конструкції на всіх етапах навантаження;



- визначення несучої здатності, механізму та характеру руйнування конструкції;
- вдосконалення конструкції на основі отриманих результатів;
- внесення коректив в існуючий чи розробка нового методу розрахунку.

Основне завдання випробувань споруд полягає у встановленні відповідності між реальною поведінкою будівельної конструкції і її розрахунковою схемою. Інженерні споруди – достатньо складні механічні системи, які містять багато елементів в умовах складного напружено-деформованого етапу й утворюють просторові конструкції. Незважаючи на суттєвий розвиток сучасної будівельної механіки, широке застосування швидкодіючої обчислювальної техніки, під час розгляду конкретних об'єктів, зокрема і будівельних конструкцій, виникає необхідність ідеалізації розрахункових схем, котрі враховують тільки головні властивості, які характеризують стан реальної конструкції. Окрім цього, поведінці будівельних конструкцій притаманні фактори випадкового характеру, наприклад, характеристики міцності навіть такого однорідного матеріалу, як сталь, піддаються розкиду. Так, аналіз меж текучості для сталі Ст.3, проведений М. С. Стрелецьким, показав, що вони можуть змінюватись від 200 до 320 МПа. Ще більший розкид значень міцності має бетон і деревина. Мінливі також і навантаження, які діють на будівельні конструкції, будівлі і споруди: власне вага, вітер і сніг, кранові навантаження та ін.

Процес виготовлення окремих елементів конструкцій, їх транспортування і монтаж також впливають на можливість появи випадкових відхилень від заданих розмірів. Ці відхилення регламентуються відповідними технологічними допусками. Якість виготовлення елементів будівельних конструкцій оцінюють неруйнівними і руйнівними методами. Найбільш точну інформацію про несучу здатність конструкцій дає руйнівний метод. Однак доводити кожен конструкцію при випробуванні до руйнування абсурдно.

Неруйнівний не завжди дає повну характеристику випробовуваного об'єкта, тому ці два методи використовують разом. Якщо провести неруйнівні та руйнівні випробування певної кількості об'єктів, а потім порівняти результати, то можна встановити певну взаємозалежність між ними. Таким чином, випробування конструкцій, будівель і споруд як складовий елемент обстеження, за своєю методологією, апаратурним забезпеченням і методом обробки є самостійним напрямком експериментальної механіки. Мета

цього напрямку – створити методи і засоби, які дозволять на базі експериментальних досліджень отримати об’єктивну інформацію про властивості конструкційних матеріалів, поведінку елементів конструкцій і дійсну роботу споруд. Ніякий, навіть найточніший розрахунок, не може дати об’єктивну інформацію про поведінку реальних систем.

## **1.2. Методи обстеження та випробування будівель і споруд**

В умовах прискореного науково-технічного прогресу інтенсивно удосконалюються різні технологічні процеси. Це несе за собою заміну застарілого обладнання на нове, високопродуктивне, яке працює на вищих швидкостях, що може зумовити підвищення навантажень, встановлених нормами на будівельні конструкції. Створення гнучких виробництв пов’язано зі зміною архітектурно-планувальних рішень для будинків і споруд, які експлуатуються [128].

Для реконструкції старого житлового фонду і приведення його рівня комфортності до сучасних вимог необхідно оцінити дійсний стан будівельних конструкцій, будівель і споруд, вирішити питання про можливість їх подальшої експлуатації або реконструкції і посилення. Для цього треба обстежити конструкції і споруди та підготувати відповідні рекомендації. На їх основі інженери-проектувальники розробляють необхідні конструктивні рішення. Обстеження будівельних конструкцій складається із трьох основних етапів [98, 128]:

- ознайомлення з проектною документацією, робочими і виконавчими кресленнями-актами на сховані роботи: вивчення (за наявності) матеріалів попередніх обстежень та випробувань;

- візуальний огляд об’єкта, установки щодо їх відповідності об’єкту проекту, виявлення видимих дефектів і їх фіксація (наявність тріщин, проточок, відшарувань захисного шару у залізобетонних елементах, корозія металевих елементів, прогинів елементів, стан стиків, зварних, болтових і клепанних з’єднань і т. ін.), складання схем дефектів споруди, проведення комплексу дослідження неруйнівними методами;

- аналіз стану споруди і розробка рекомендацій з ліквідації виявлених дефектів.

Ознайомлення з проектною і виконавчою документацією дає змогу оцінити прийнятні конструктивні рішення, виявити елементи споруд, які працюють у найбільш важких умовах, встановити значення діючих навантажень.

Візуальна оцінка споруди дає першу вихідну інформацію, дає змогу судити про, ступінь зношування елементів конструкції, дає можливість конкретизувати подальші випробування. В першу чергу це пов'язано з використанням неруйнівних методів, тобто таких, які не призводять до руйнування окремих елементів і конструкції загалом. Такі випробування можна проводити і під статичним, і під динамічним навантаженнями. Комплекс таких експериментів включає визначення значень геометричних параметрів споруди (прольоти, товщини, висоти і т. п.), характеристик міцності і структурних властивостей матеріалу, товщину захисного шару бетону, розташування арматури, прогинів і деформацій елементів, динамічних амплітуд, переміщень, періодів коливань конструкцій, прискорень окремих точок I-III [127, 128].

В обчисленнях споруд широко використовують методи інженерної геодезії, з допомогою яких вимірюють осадку будівель і споруд, їх зсуви, параметри тріщин і деформаційних швів, прогини елементів конструкцій. Методами інженерної фотометрії визначають переміщення точок і деформацію елементів конструкцій під статичними і динамічними впливами. В останній час ефективно розвиваються методи лазерної інтерферометрії.

Аналогічні методи використовують під час контролю якості виготовлення елементів будівельних конструкцій і їх монтажу на будівельних площадках.

Якість виготовлення елементів будівельних конструкцій оцінюють неруйнівними і руйнівними методами.

Найбільш точну інформацію про несучу здатність конструкцій дає руйнівний метод. Однак піддавати кожний виріб випробуванням до руйнування абсурдно. Неруйнівний не завжди дає повну характеристику випробовуваного об'єкта, тому ці два методи використовують разом. Якщо провести неруйнівні та руйнівні випробування певної кількості об'єктів, а потім порівняти результати, то можна встановити певну взаємозалежність між ними.

Таким чином, випробування конструкцій, будівель і споруд є складовим елементом обстеження, за своєю методологією, апаратурним забезпеченням і методом обробки є самостійний напрямок експериментальної механіки. Мета цього напрямку – створити методи і засоби, які дозволять на базі експериментальних досліджень отримати об'єктивну інформацію про властивості конструкційних матеріалів, поведінку елементів конструкцій і дійсну роботу споруд. Ніякий, навіть найточніший розрахунок, не може дати об'єктивну ін-

формацію про поведінку реальних систем.

У будівельній механіці, теорії пружності і пластичності, опору матеріалів вивчають найсучасніші методи розрахунку ідеалізованих розрахункових схем, але будь-який із них повинен бути побудований на об'єктивній інформації, отриманій із досліду, і ні один із них не може бути рекомендованим до застосування для практичних розрахунків без експериментальної перевірки.

Парадоксальним є те, що в рамках сформульованих розрахункових схем з використанням сучасних ПК можна отримати результати з похибкою  $10^{-8}$  і менше (це визначається кількістю цифр величини, яка видається на цифровий друк, або точністю видачі інформації на графобудувач), тоді як вихідна, яка вводиться у розрахунок, інформація про навантаження, характеристики міцності і відхилення параметрів дійсної споруди від його розрахункової схеми характеризується похибкою 20...10%. Це не знижує ролі сучасних методів теорії розрахунку споруд, а тільки підкреслює необхідність взаємного узгодження точності методів розрахунку споруд з точністю вихідних засад, що визначаються експериментом, і точністю результатів, які фіксуються під час експерименту.

Суттєво впливає на формування методів і засобів випробування конструкцій, характер зміни зовнішніх навантажень, які діють на будівельні конструкції, будівлі і споруди. Тут розрізняють статичні навантаження, постійні за значенням або поступово змінні в часі, і динамічні, які швидко змінюються в часі.

Можна сформулювати три основні задачі, які розв'язують з допомогою методів і засобів випробування будівельних конструкцій, будівель і споруд. **До першої** – слід віднести визначення теплофізичних, структурних параметрів міцності і деформаційних властивостей конструкційних матеріалів і виявлення характеру зовнішнього впливу на конструкцію.

**Друга задача** – пов'язана з порівнянням розрахункових схем будівельних конструкцій, зусиль і переміщень, які визначаються розрахунковим шляхом, з відповідними зусиллями і переміщеннями у реальній конструкції або її моделі.

**Третя задача** – ідентифікація розрахункової моделі, яка отримала розвиток тільки в останні роки. Ця задача пов'язана з синтезом розрахункових схем, який впливає із аналізу результатів експериментальних досліджень.

Теоретичне розв'язання цієї задачі стикається з проблемами кібернетики, частково з проблемою “чорного ящика”. Однак на ві-

дміну від класичної постановки проблеми при розгляді практичних задач відомі деякі характерні параметри системи, до яких можна віднести інформацію про геометрію конструкції в плані, визначену архітектурно-планувальним рішенням, про вид або характер несучих конструкцій, набір конструктивних елементів, які використовують у спорудах. На підставі аналізу експериментально одержаних даних про зовнішні впливи і реакції системи (прогини, деформації, швидкості, прискорення) у рамках заданої розрахункової моделі знаходять її параметри.

### **1.3. Метрологічне забезпечення експериментальних досліджень та випробувань будівельних конструкцій і споруд**

**Методологія експериментальних досліджень.** Під час випробувань, оцінюючи якість будівельних деталей, виробів, конструкцій, відповідність їх проекту або міцність споруди, слід вимірювати певні технічні параметри.

Для забезпечення правильності вимірювань і потрібної точності показів приладів необхідні однакові вимірювання, тобто збігання результатів вимірювань, викопаних у різних місцях різними приладами. Цим займається метрологія [128, 217].

В умовах прискороного науково-технічного прогресу в будівництві особливе значення надається уніфікації будівельних конструкцій, деталей і вузлів, підвищенню якості виготовлення і монтажу будівельних конструкцій. Для розв'язку поставлених задач слід суттєво підвищити роль метрології і стандартизації.

**Основні поняття метрології.** Завдяки метрології забезпечується необхідна точність приладів у випробуваннях, на що звертають особливу увагу дослідники-експериментатори. Всі прилади і пристосування повинні бути виготовлені з потрібною точністю і періодично перевірятись. Градування приладів виконує спеціалізована метрологічна служба і воно полягає у виявленні фактичної точності шляхом одноразового вимірювання шуканого фактора (переміщення, деформації, розкриття тріщин, осадку опор (фундаментів) і ін.); зразковий прилад повинен мати вищу точність вимірювань, ніж той, яким перевіряється.

У метрології розглядають загальну теорію вимірювання, одиниці фізичних величин і їх системи, методи і засоби вимірювань, методи визначення точності вимірювань, основи забезпечення єдності вимірювань і однаковості засобів вимірювань, методи передачі розмірів одиниць від еталону або зразкових засобів вимірювань

до робочих засобів.

Під метрологічним забезпеченням розуміють встановлення і використання наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення однозначності (єдності) і точності вимірювання, яка вимагається. Метрологічне забезпечення експериментальних досліджень охоплює такі системи:

- державних еталонів одиниць фізичних величин, яка забезпечує відтворення одиниць з найвищою точністю;

- передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів всім засобам вимірювання з допомогою зразкових й інших засобів перевірки;

- розробки, постановки на виробництво і випуск в обіг робочих засобів вимірювання, які забезпечують визначення з точністю, яка вимагається, характеристик продукції, технологічних процесів та інших об'єктів у сфері матеріального виробництва, наукових досліджень тощо;

- стандартних довідкових даних про фізичні константи та властивості речей і матеріалів, які забезпечують достовірними даними наукові дослідження, розробку технологічних процесів одержання та використання матеріалів і конструкції.

Окрім цього, у метрологічне забезпечення входять:

- державні випробування або метрологічна атестація засобів вимірювань, які призначені для серійного або масового виробництва і ввозу їх з-за кордону партіями, які зумовлюють однотипність засобів вимірювання під час їх розробки і випуску в кругообіг;

- обов'язкова державна та відомча перевірка засобів вимірювання, які забезпечують однотипність (однаковість) засобів вимірювання під час виготовлення, експлуатації й ремонту;

- стандартні зразки зі складом і властивостями речовин і матеріалів, які забезпечують відтворення одиниць величин, що характеризують склад і властивості речовин і матеріалів.

Визначимо основні поняття, пов'язані з контролем засобів вимірювання. Перевірка засобів вимірювання – визначення метрологічними органами похибок і встановлення їх придатності до використання. Розрізняють державну (яка виконується органами державної метрологічної служби) і відомчу (яка проводиться органами відомчої метрологічної служби) перевірки.

Під час атестації метрологічні органи досліджують засоби вимірювання для визначення їх метрологічних властивостей і видачі документа з вказаними даними.

Перевірочна схема – затверджений в установленому порядку документ, який вказує засоби, методи і точність передачі розміру одиниці фізичної величини від еталона робочим засобом вимірювання. Розрізняють вітчизняні та локальні (окремих органів метрологічної служби) перевірочні схеми.

Засоби перевірки – це технічні засоби, необхідні для контролю засобів вимірювання відповідно з вимогами нормативно-технічних документів. Вони охоплюють робочі еталони, зразкові засоби вимірювання, в тому числі стандартні зразки і зразкові міри, допоміжні прилади, пристрої і матеріали, перевірочні пристрої.

Засоби вимірювання – це технічні засоби, які мають нормативні метрологічні характеристики. Вони складаються зі системи мір, вимірювальних приладів і перетворювачів, а також установок і систем.

Під вимірювальним приладом розуміють засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, яка доступна для безпосереднього сприйняття спостережень. Вимірювальний перетворювач – це засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі до подальшого перетворення, опрацювання та зберігання, але яка не піддається безпосередньому сприйняттю спостереження.

Вимірювання – це процес знаходження якої-небудь фізичної величини з допомогою технічних засобів і порівняння з еталоном. Вимірювання включає такі елементи: об'єкт вимірювання, властивості або стан якого характеризує величину, що вимірюється; одиницю виміру; технічний засіб вимірювань; градування у вибраних одиницях; метод вимірювання; реєстратор, який сприймає результат вимірювання; кінцевий результат вимірювання.

Будь-які вимірювання обов'язково супроводжуються похибками. Різниця між точним значенням відповідної величини і заміряним називається абсолютною похибкою. Повнішою характеристикою точності результатів є відносна похибка, яка рівна модулю відношення абсолютної похибки до виміряного значення величини.

За характером проявлення у дослідах похибки ділять на випадкові та систематичні. Випадкові під час повторення дослідів змінюються нерегулярно, непередбачено, тому спостерігається розкид значень. Систематичні похибки під час повторних випробувань у стаціонарних умовах повторюються без змін, або змінюються закономірно залежно від тих або інших факторів.

Причиною інструментальних похибок є неточності під час ви-

готовлення і градування інструменту; похибки відліку показів і похибки наведення пов'язані з неідеальним виконанням процедури вимірювання; значні похибки виникають внаслідок несправності приладу і через неухважність спостерігача.

Систематичні похибки виявляють скурпульозним аналізом експерименту, методики вимірювання. Це дає можливість внести поправки для їх ліквідації, міняючи методику дослідження.

Випадкові похибки не можна усунути внесенням поправок. Тому за результати багаторазових спостережень беруть найбільш імовірне значення вимірювальної величини й оцінюють похибку вимірювання. Для цього використовують теорію ймовірності і математичну статистику.

Всі вимірювальні прилади точні й чутливі. Точність приладу – це мінімальне значення вимірюваної величини (деформації й ін.), відлік якої можливий за його шкалою. Чутливість приладу – найменше значення вимірюваної величини, на яку реагує прилад. Для повного використання чутливості приладів бажана їй відповідність точності. Взаємозв'язок точності та чутливості виявляють під час перевірок приладів.

Статичному випробуванню властива дуже повільна зміна інтенсивності зовнішнього навантаження в часі і просторі без урахування сил інерції. Під час таких випробувань встановлюють параметри папружено-деформованого стану конструкцій, за якими визначають деформації, переміщення, напруження, момент утворення і величину розкриття тріщин, зовнішнє навантаження, форму і характер вичерпання міцності (крихке або пластичне). Для замірів вказаних параметрів використовують механічні, електромеханічні й електричні прилади – тензометри, тензорезистори, індикатори, прогиноміри, зсувоміри, клинометри; у лабораторних умовах – деякі експериментальні методи: поляризаційно-оптичний, Муара, крихких покриттів, голографічний; для вимірювання лінійних і кутових переміщень натуральних споруд – геодезичні методи.

Найточнішими є електричні прилади, які дозволяють заміряти параметри у багатьох точках дистанційно і з мінімальною трудоемністю, а інколи й автоматизовано. Завдяки їм можна повністю автоматизувати випробування з виводом результатів не тільки на цифродрук, але й на ПК і графобудувачі: процес зняття показів, їх обробка й аналіз проходять повністю без участі людини.

Механічні прилади менш точні, з їх допомогою неможливо дистанційно зняти покази, необхідно забезпечити доступ спостерігача



безпосередньо до приладу, що в багатьох випадках пов'язано з додатковими заходами з техніки безпеки, процес випробувань набагато довший і трудомісний, ніж при використанні електричних приладів.

Все таки інколи, особливо за необхідності швидкого одержання експериментальних даних при невеликій кількості точок вимірювань, механічні прилади незаміними.

**Метрологічне забезпечення експерименту та стандартизація вимірювань.** Під час вивчення явищ і предметів довкілля, а також у своїй щоденній практичній діяльності людині доводиться вимірювати ті або інші фізичні величини, які характеризують явища або предмети. Будь-які сучасні експериментальні дослідження неможливі без належного метрологічного забезпечення.

Під вимірюванням фізичної величини розуміємо сукупність експериментальних операцій для знаходження кількісного значення цієї величини.

Одиниці вимірювання різних фізичних величин об'єднані в систему. Розмірність фізичної величини – вираз, який відображає зв'язок величини з основними величинами системи, у якому коефіцієнт пропорційності прийнятий рівним одиниці. Так, наприклад, розмірність для напруження  $\sigma = P/A^2$  визначає рівняння

$$[\sigma] = \frac{[P]}{[A]^2}, \quad (1.1)$$

де:  $[\sigma]$  – розмірність напруження;  $[P]$  – розмірність сили;  $[A]$  – розмірність площі.

Аналізують розмірності, якщо завчасно відомо, що між всіма значеннями суттєвих параметрів, які визначають це явище, є показниковий функціональний зв'язок.

Потрібно мати на увазі, що під час вимірювання фізичної величини її порівнюють не з одиницею вимірювання, а з речовим відтворенням цієї одиниці у формі конкретного зразка – міри. Отже, міра – засіб вимірювання, який призначається для повторення (відтворення) фізичної величини, значення якої відомі.

Наприклад, міра довжини – вимірювальна лінійка, міра маси – гиря і т.д.

Міри, які відтворюють одиницю з найбільшою точністю, називаються еталонами. Останні встановлюють за рекомендаціями міжнародних конгресів, виготовляються з гранично можливою точністю і зберігають в особливих умовах. Їх для безпосередніх вимірювань не застосовуються, а тільки для перевірки робочих еталонів, які у свою чергу використовують для перевірки зразкових мір і вимірювальних приладів, за якими звіряються робочі міри і прилади.

Вимірювання фізичних величин прийнято ділити на три основних види: прямі, опосередковані і сукупні. Ті, які проводяться під час експериментів і отримували шляхом порівняння зі зразковими еталонними мірами, є прямими. Опосередковані викопують шляхом прямих вимірювань величин, пов'язаних певною залежністю із шуканою. Під час сукупних вимірюють одночасно декілька величин, значення яких знаходять шляхом розв'язку отриманої системи рівнянь.

Встановлення одиниць вимірювання фізичних величин, їх відтворення з допомогою еталонів і розробка методів вимірювання складають предмет метрології.

Метрологія обґрунтовує вибір одиниць фізичних величин і будує їх системи: експериментальне відтворення одиниць з допомогою еталонів; створення методів і засобів передачі одиниць у практику вимірювань; розробка стандартних зразків речовин і матеріалів, визначення фізичних констант і стандартних довідкових даних про властивості матеріалів, речовин і ін.

У законодавчому розділі метрології розробляються заходи, які стосуються узаконення одиниць фізичних величин, засобів вимірювання, контролю за їх станом і т.д. Перевіркою мір і вимірювальних приладів займається метрологічна служба країни, яка забезпечує єдність вимірювань.

Проблеми метрологічного забезпечення вимірювань в експериментах нерозривно пов'язані з задачами, які ставляться перед стандартизацією. Стандартизація – це встановлення і застосування правил для впорядкування діяльності у певній області на користь і за участю всіх зацікавлених сторін і, зокрема, для досягнення загальної оптимальної економії зі збереженням функціональних умов і вимог техніки безпеки.

Об'єктами стандартизації є конкретна продукція, норми, вимоги, методи, терміни, позначення і т. ін., які мають перспективу багаторазового використання, застосовані в науці, техніці, будівництві. У будівництві стандартизації підлягають методи розрахунку і проектування конструкцій і споруд, вимоги до матеріалів і виробів, допуски на стадії монтажу і будівництва конструкцій будівель і споруд, методи випробувань та проведення вимірювання, методи подання й обробки результатів.

Державні стандарти України (ДСТУ) в області будівництва і будівельних конструкцій затверджуються Державним комітетом з архітектури, будівництва та житлової політики України.

В області будівництва поряд зі стандартами діють державні

будівельні норми (ДБН). Ці документи містять окремі загальні елементи, але загалом вони суттєво різні. ДБН встановлюють вимоги до всієї будівельної продукції та містять норми будівельного проектування, тоді як ДСТУ - вимоги до будівельних матеріалів і виробів масового виробництва, методів випробування матеріалів і конструкцій, вимірювань, обробки і подання результатів.

Залежно від змісту стандарти поділяються на 13 окремих видів. Для засвідчування і випробування конструкцій і споруд найбільш цікаві такі:

- стандарти технічних умов, які містять всесторонні вимоги до продукції під час її виготовлення, поставки й експлуатації, регламентують методи випробувань, правила приймання;
- стандарти технічних вимог, які нормують показники якості, надійності та довговічності продукції, встановлюють строк служби і т. ін.;
- стандарти методів випробувань, які включають вимоги про порядок відбору проб, або зразків, методи випробувань матеріалів і виробів, які використовуються для оцінки якості продукції. Ці стандарти забезпечують єдність методів і засобів випробувань. У стандартах на методи випробувань містяться також вимоги до вимірювальних приладів, інструментів і устаткування, які використовують для контролю показників якості;
- стандарти правил приймання, маркування, установа, транспортування і зберігання, які регламентують, зокрема, порядок приймання виробів, вид і програму випробувань під час приймання.

У більшості будівельних стандартів наведено й супутні дані, властиві стандартам деяких видів.

Стандарти суттєво впливають на темпи розвитку і рівень виробництва. Базуючись на останніх досягненнях науки і техніки, а також практичному досвіді, стандартизація в багатьох випадках не тільки фіксує досягнутий рівень виробництва, але є одним із важелів прогресу.

#### **1.4. Загальні положення контролю якості матеріалів, конструкцій і споруд**

Якість будівництва довільного об'єкта перш за все залежить від якісної проектної документації, прийнятих архітектурно-планувальних і конструктивних рішень. Нерідкі випадки, коли будівельні конструкції або елементи впроваджують без недостатньої експериментальної перевірки.

Окремі види робіт у технічній документації часто не пов'язані між собою, особливо загальнобудівельні роботи з санітарно-технічними й електротехнічними [127, 128].

Якість споруджуваних житлових і цивільних будівель залежить від якості матеріалів, які використовують, деталей і конструкцій, правильності їх перевезення, складування і зберігання готових виробів, будівельно-монтажних робіт, кваліфікації будівельників і т.д.

Однією із суттєвих причин зниження якості будівельно-монтажних робіт є постачання на будівельний майданчик індустріальних конструкцій, виробів і матеріалів, які не відповідають проектним рішенням і технічним умовам. Підприємства будівельної промисловості повинні забезпечити випуск деталей і конструкцій підвищеної готовності, а також їх високу якість. З цією метою виробничий персонал підприємств, особливо працівники відділів технічного контролю і лабораторій, зобов'язані організувати поопераційних нагляд за продукцією на всіх стадіях технологічного процесу.

Однією з головних умов досягнення високої якості будівельно-монтажних робіт є систематичний контроль за прийманням матеріалів, конструкцій і виробів, які постачають заводи–виготовлювачі, за веденням робіт на всіх стадіях будівництва, а також належна (скуппульозна) перевірка якості робіт під час остаточної здачі–приймання об'єкта в експлуатацію. Для цього необхідно посилити відповідальність інженерно-технічного персоналу, технічного нагляду замовника, авторського нагляду, суспільного і Державного архітектурно-будівельного контролю за якістю будівництва. З цією метою Науково-дослідний інститут будівельного виробництва Держбуду України і Державна будівельна інспекція України розробили методику оцінки якості будівельно-монтажних і спеціальних робіт, які виконуються бригадами, зайнятими в промисловому, сільському, житловому і культурно-побутовому будівництві.

Питання покращення якості будівництва та експлуатації будівель і споруд охоплює широке коло технічних, організаційних і виховних проблем. Найважливіше місце серед них займає контроль якості будівельно-монтажних робіт впродовж всього терміну спорудження будівлі чи споруди відповідно з вимогами будівельних норм і технічних умов.

Завдяки стандартизації будівельних матеріалів, конструкцій і виробів, конструктивних і архітектурно-планувальних рішень значно покращуються якісні показники будівель і споруд.

Один із напрямків стандартизації пов'язаний з розробкою

норм, методів, правил, які визначають методи контролю кількісних і якісних характеристик властивостей продукції. Якість продукції – сукупність властивостей продукції, що обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно з призначенням. Показник якості продукції – кількісна характеристика властивостей, які входять у склад її якості, розглядаються стосовно до певних умов її створення й експлуатації або вжитку. Номенклатура показників якості залежить від призначення продукції. При розгляді таких показників слід розрізняти найменування (наприклад, границя (межа) пружності конструкційного матеріалу) і їх числові значення.

Показники якості бувають одиничними, коли відносяться тільки до одного із властивостей продукції; комплексними, коли відносяться до декількох. Узагальнюючий показник якості продукції – комплексний показник, який відноситься до такої сукупності її властивостей, за якою прийнято рішення оцінювати якість. Зокрема, під час порівняльного аналізу різних конструктивних рішень щодо взаємозамінних за розмірами і навантаженнями плит перекрив як узагальнений економічний показник можна прийняти приведені затрати, які враховують витрачання матеріалів, вартість виготовлення, транспортування і монтажу, влаштування теплового ізоляційного килима і тощо. Інтегральний показник якості продукції також є комплексним, який відображає співвідношення загального корисного ефекту від експлуатації або споживання продукту й експлуатацію або споживання. Розрізняють реально досягнуті та базові показники якості. Базовий прийнятий за вихідний при порівнювальних оцінках.

Від досконалості контролю якості, технічного та апаратного забезпечення і виконання залежить ефективність всієї системи. Мета контролю – перевірка відповідності показників якості продукції встановленим вимогам, які можуть бути зафіксовані у стандартах, технічних умовах, договорах про постачання, паспорті виробу й інших документах.

Об'єктом контролю може бути продукція або технологічний процес. Контроль здійснюється як на стадії проектування, так і на стадії виробництва й експлуатації. Розрізняють вхідний, оперативний і приймальний контроль. Вхідний пов'язаний з перевіркою продукції постачальника, а також тієї, що надійшла до споживача і призначена для використання під час виготовлення, ремонту або експлуатації. Об'єктами такого контролю може бути проектна документація, півфабрикати, вироби. Орієнтаційний контроль – контроль продукції

або технологічного процесу під час виконання або після завершення певної операції. Під час приймання перевіряють готову продукцію і за результатами вирішують про його постачання або використання продукції, чи про введення об'єкта в експлуатацію.

Контроль може бути суцільним, коли вивчають кожен об'єкт, або вибіркоvim, коли випробовують тільки деяку кількість продукції. Розрізняють два основних методи контролю: неруйнівний і руйнівний. Під час руйнівного виріб доводять до такого стану, коли подальше його використання неможливе. Цей метод пов'язаний тільки з вибіркоvim контролем. За використанням засобів контролю для одержання першої інформації розрізняють такі його види:

- вимірювальний – здійснюється з обов'язковим застосуванням засобів вимірювання;
- реєструвальний, пов'язаний з реєстрацією кількості прояву якісних ознак продукції;
- органоліптичний – коли первинна інформація сприймається якісно тільки з допомогою органів чуття, причому можливе використання приладів, які дають змогу збільшити точність визначення або сприйняття органів чутливості;
- візуальний – органоліптичний, що здійснюється тільки органами зору;
- технічний огляд-контроль, що проводиться в основному за допомогою органів чутливості і, за необхідності, достатньо простими засобами. Технічний контроль, зазвичай, включає детальне ознайомлення з проектною і виконавчою документацією.

Існує декілька видів контрольних випробувань продукції:

- попередні, які проводяться на дослідних зразках для визначення можливості їх пред'явлення на приймальні випробування;
- приймальні – контрольні випробування дослідних зразків продукції, а також виробів одиничного виробництва для виявлення доцільності постачання на виробництво цієї продукції або передачі її в експлуатацію;
- приймально-здавальні – контрольні випробування готової продукції під час приймального контролю. Такі випробування, як правило, проводить виготовлювач. Для продукції серійного виробництва під час таких випробувань не перевіряють комплектність і якість технічної документації, а тільки вирішують питання про прийняття або відхилення контрольної партії;
- періодичні випробування проводять періодично в об'ємах і в строки, встановлені технічною документацією;

- типові випробування – після внесення змін у конструкцію або технологію виготовлення для оцінки ефективності та їх доцільності;
- атестаційні здійснюють з метою оцінки рівня якості продукції під час її атестації.

Контрольні випробування розрізняють також за рівнем виконавців, які їх проводять: державні міжвідомчі, відомчі.

Велика увага приділяється автоматизації контролю, що дає можливість своєчасно виявити порушення технологічних режимів і вплинути на окремі етапи процесу. З цією метою використовують як міні-ПК, так і мікропроцесорну техніку. Одночасно розвиваються статистичні методи контролю якості – пов’язані з контролем певної вибірки із генеральної сукупності, оцінкою математичного очікування досліджуваного фактора, його дисперсії та мінливості, побудовою інтервалів достовірності. Для цієї мети використовують математичний апарат статистики, який включає дисперсний, кореляційний і регресивний аналізи, а також методи математичного планування експерименту.

### **1.5. Поняття про оцінку надійності конструкцій будівель і споруд**

Поняття про оцінку надійності конструкцій будівель і споруд є однією із головних задач обстеження та випробування їх дійсного стану і прогнозування можливості їх подальшої експлуатації. Ці проблеми пов’язані з оцінкою надійності розглядуваних систем.

Під надійністю розуміють властивість системи виконати поставлені перед нею функції у конкретних умовах експлуатації на розглядуваному інтервалі часу. Надійність – це комплекс властивостей, які залежно від призначення й умов експлуатації об’єкта може включати безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і зберігати в окремих або у певній сукупності цих властивостей як для об’єкта, так і для його частин. Стосовно будівельних об’єктів можна виділити три основні часткові властивості [127, 128]:

– безвідмовність – властивість об’єкта зберігати роботоздатність протягом деякого часу;

– довговічність – властивість об’єкта зберігати роботоздатність до настання граничного стану за встановленої системи технічного обслуговування та ремонтів;

– ремонтпридатність – властивість об’єкта, яка полягає у пристосуванні до попередження і виявлення причин виникнення відказів, пошкоджень і ліквідація їх наслідків шляхом ремонтів і техніч-

ного обслуговування.

Суттєвим поняттям у математичній теорії надійності є відмова – порушення роботоздатності об'єкта. Під напрацюванням розуміється тривалість функціонування об'єкта. Технічний ресурс, або просто ресурс, визначається як його напрацювання від початку експлуатації до настання граничного стану.

Ці властивості можна охарактеризувати кількісними показниками надійності. Так, до показників безвідмовності відносяться ймовірність безвідмовної роботи (ймовірність того, що у межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникне) і середнє напрацювання до відмови (математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови). Показниками довговічності є: гамма-відсотковий ресурс-напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану з заданою ймовірністю з процентів, середній ресурс – математичне очікування ресурсу і ін. Ймовірність відновлення у заданий час (ймовірність того, що час відновлення роботоздатності об'єкта не перевищує заданого) і середній час

### **1.6. Історичний нарис розвитку методів досліджень та випробувань**

Обстеження та випробування нерозривно зв'язані з самим будівництвом, і практично на всьому шляху розвитку людства експериментальні дослідження, хай і не систематизовані, супроводжували будівельну практику. Найпростіші елементи досліджень, необхідні для процесу будівництва, поступово перейшли на якісно вищий рівень.

Перші будівельники вчилися у природи та розвивали конструкції будівель і споруд методом «проб і помилок». Найбільші споруди стародавнього світу – єгипетські піраміди – у своєму розвитку пройшли ряд етапів, коли нагромадження досвіду будівництва дало змогу перейти від ступінчатих пірамід до власне пірамід, поступово збільшуючи їх висоту і об'єм. Прикладом пошуків єгипетськими архітекторами шляхів покращення роботи конструкцій пірамід є влаштування розвантажувальних камер над поховальним приміщенням у піраміді Хеопса. Одним із перших штучних будівельних матеріалів була цегла-сирець, її використовували в Єгипті та стародавніх державах Месопотамії. Це був композитний матеріал, готували його із річкового глинистого мулу, додаючи дрібну гальку та рублену солому для зменшення осадки при висиханні та збільшення міцності (рис. 1.1). Цю суміш, глинобетон, вкладали



в дерев'яні форми – рамки, які потім знімали, цегла висихала на сонці. Міцність такої цегли-сирця доходила до 3-4 МПа. Напевно, практичними дослідженнями ще в державах Месопотамії – Шумері, Ассирії та Вавилоні встановили, що випалена цегла має більшу міцність та довговічність, і вже тоді при будівництві її широко використовували.

Значного розвитку будівництво досягло у Древньому Римі, саме завдяки пошуковим дослідженням римським архітекторам вдалося створити ефективні конструкції та нові матеріали. Так, цегляно-бетонними виконані куполи римського Пантеону, римського храму Мінерва-Медіка, терем Каракали та ін. Із полегшеної цегли зведено вражаючий довершеністю купол храму св. Софії в Константинополі (саме після того, як перший купол зруйнувався від власної ваги).

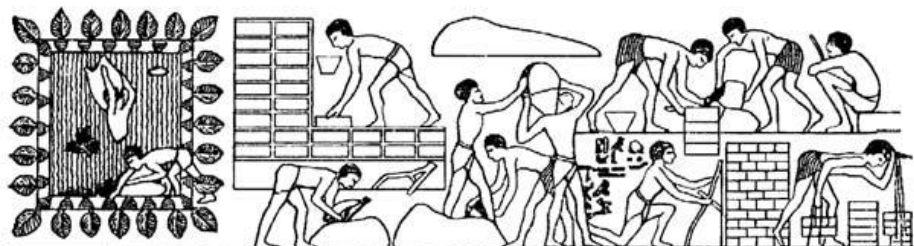


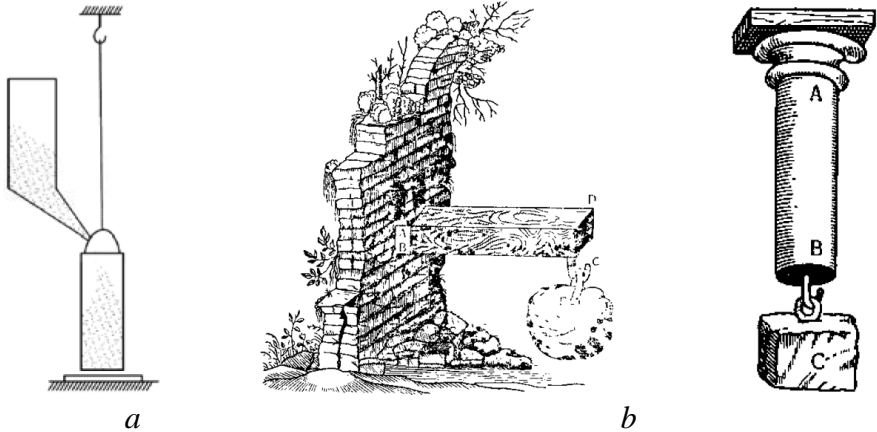
Рис. 1.1. Виробництво цегли-сирця із нільського мулу в Древньому Єгипті

У своїх Десяти книгах про архітектуру видатний древньоримський архітектор Вітрувій в I ст. до н. е. вказував, що цеглу-сирець не можна робити із піщаної кам'янистої та щебенистої глини, бо така цегла буде важка і від дощів при намоканні буде просідати і кришитися. Причина – грубі фракції в глині не дають змоги їй зв'язати солому. Про пісок Вітрувій писав, що він не повинен мати домішок землі – це вплине на зниження міцності розчину. А якщо використати морський пісок для розчину, то сіль буде руйнувати стіни. Це свідчить, що вже в давні часи архітектори аналізували роботу конструкцій та досліджували властивості будівельних матеріалів [127, 128].

Перші літературні згадки, пов'язані з експериментальним вивченням властивостей матеріалів, містяться у працях генія епохи Відродження Леонардо да Вінчі (1452–1519 р.р.). У замітці «Випробування залізних дротів різних довжин» він дав ескіз установки з елементом оберненого зв'язку (рис. 1.2.). До розтягнутого дроту була

приєднана ємність, заповнена піском. Під час обриву дроту відключався пристрій живлення. Одночасно були проведені дослідження при різних довжинах дроту. Леонардо да Вінчі вивчав також вплив прольоту згинальних балок на їх несучу здатність. При дослідженні колон він дійшов висновку про вплив розмірів поперечного перерізу та довжини на міцність колони (це була перша згадка про стійкість). Ідеї Леонардо да Вінчі на багато років були приховані у його записних книжках, публікація яких відноситься до початку ХХ ст.

Великий внесок у науку про міцність конструкцій зробив чудовий вчений-енциклопедист Галілео Галілей (1564–1642 рр.).



*Рис. 1.2.* Дослідження конструкцій в епоху Середньовіччя: *a* – схема Леонардо да Вінчі для випробування дроту на розрив; *b* – малюнки Г. Галілея до випробування балок і стержнів

У 1638 р. він видав книгу «Бесіди і математичні докази, які відносяться до двох нових галузей науки, котрі стосуються механіки і місцевого руху». У цій праці містяться посилання на деякі спостереження Г. Галілея. Він вказав, що під час будівництва геометрично подібних споруд зі збільшенням їх абсолютних розмірів, споруди ставатимуть щораз слабшими. Далі він випробував на простий розтяг брус і встановив, що його міцність пропорційна площі поперечного перерізу і не залежить від довжини. Г. Галілей досліджував брус, защемлений одним кінцем, на згин і встановив певні кількісні залежності, які впливають на фізичне розуміння несучої здатності згинального бруса. Потрібно зауважити, що Г. Галілей вперше оцінив несучу здатність конструкцій з позиції граничних станів. Ідеї його методу розрахунку розвинулися у 30-ті роки ХХ століття. Г. Галілей встановив, що загальний момент від власної ваги балки зростає пропорційно квадрату її довжини, експеримента-

льно довів вплив геометричних розмірів бруса на його несучу здатність. Ним встановлено, що геометрично подібні консольні стержні, навантажені власною вагою, нерівноцінні. Він розв'язав задачу про консолі рівного опору. На підставі проведених експериментальних досліджень, Г. Галілей дійшов до правильної оцінки несучої здатності труб і суцільних кругових стержнів рівної площі.

Цікаві дослідження виконав Е. Маріотт (1620–1684 рр.), який вивчав явище удару, поведінку балок під час згину, створив балістичний маятник та перші установки для випробування матеріалів на розтяг. Е. Маріотт, на основі проведених досліджень, коректує роздуми Г. Галілея, але припускає помилки в аналітичному рішенні. Прикладом його досліджень є схема для вивчення опору і міцності, яку він розробив при проектуванні трубопроводу для водопостачання Версальського палацу (рис. 1.3, а).

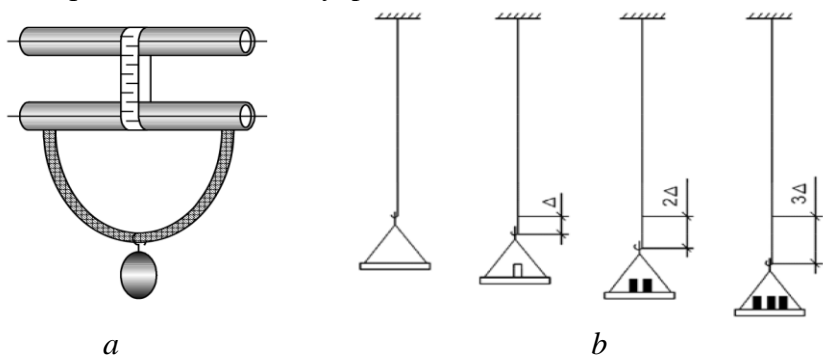


Рис. 1.3. Схеми досліджень:

а – малюнок до випробування труб Маріотта; б – досліди з дротами Гука

Суттєвий внесок у науку про опір матеріалів зробив Р. Гук (1635–1703 рр.). Ним вперше чітко сформульовано закон зв'язку сили і переміщення під час роботи матеріалу, він встановив факт, що у консольній балці під дією на її кінці зосередженої сили, направленої вниз, верхні волокна розтягуються, а нижні – стискаються. Він також встановив, що пружні тіла повертаються у початковий стан після зняття навантаження (рис. 1.3, б). Випробовуючи моделі арки, в 1732 р. французький інженер Данізі встановив, що під час руйнування арка ділиться не на три частини, як вважалося раніше, а на чотири. Даніел Бернуллі (1700–1782 рр.) вперше описав результати дослідів, пов'язаних зі встановленням частоти і форми коливань стержнів. Ш. О. Кулон (1736–1806 рр.) експериментально досліджував міцність піщаника, стискання призм та крутильні коливання. Для розв'язання останньої задачі він сконструю-

вав оригінальний прилад. П. Ван-Мустенбек (1692–1761 рр.) запропонував низку машин для випробувань на розтяг, стиск і згин.

Вже у XVIII ст. досить часто проводились випробування матеріалів та конструкцій. Створювалися спеціальні установки, наприклад, розроблена Мустенбергом для дослідження елементів на розтягування (рис. 1.4, а).

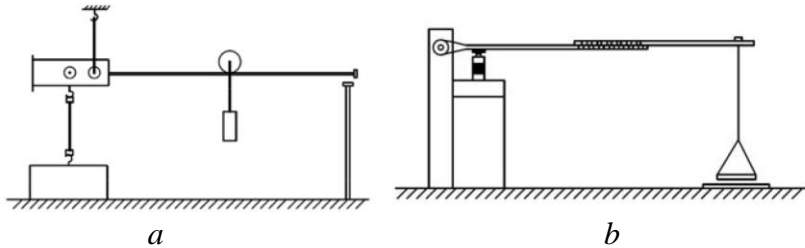


Рис. 1.4. Установки для випробування:

а – стержнів на розтягування Мустенбука (1729); б – зразків цегли Готе (1826)

Поступово зростали вимоги до контролю будівництва і з XIX ст. стало правилом перед початком робіт виконувати дослідження матеріалів чи конструкцій. Мостобудівник Готе створює важливу установку для дослідження зразків цегли (рис. 1.4, б).

Чисельні експерименти провів Ф. Дюпен (1784–1873 рр.). Він досліджував дерев'яні балки на згин. А. Дюло на початку XIX ст. виконав широкомасштабні випробування заліза та залізних конструкцій, зокрема і на поздовжній згин. Він вивчав роботу складних двотаврових балок. Т. Юнг (1773–1829 рр.) вперше дослідним шляхом встановив зміну поперечних розмірів зразків під час стискання матеріалу, звернув увагу на обмеженість застосування закону Гука, встановив великий розкид при поперечному випучуванні стиснутих колон, пояснив це відхиленням основної сили від геометричного центра елемента. Ним також ставились досліди на ударні навантаження. Г. Ляме (1795–1870 рр.) сконструював випробувальну машину, вперше використавши гідравлічний насос для створення навантаження. Цікаві досліди для виявлення характеру коливань пластин провів Е. Хладні. Покриваючи пластину тонким шаром дрібнозернистого піску, він отримав можливість продемонструвати існування вузлових ліній для різних коливань і визначити відповідну їм частоту.

У першій половині XIX ст. в Англії У. Фейрберк сконструював спеціальну машину, яка дозволила йому разом з І. Ходкінсоном провести численні випробування чавунних зразків на стиск, розтяг і згин, а також вивчити міцність пластин з кованиго заліза і

клепаних з'єднань таких пластин. Ю. Вейсбах (1806–1871 рр.) організує механічну лабораторію, в якій студенти Фрейсбургської гірничої академії самостійно випробували і дослідили матеріали під різними статичними і динамічними навантаженнями. У роботах Ж. В. Понсея (1788–1867 рр.) вперше висвітлюється проблема втоми матеріалів, яка спричинила велику кількість експериментальних досліджень і вивчення руйнування на реальних об'єктах.

Г. Джемсом і Д. Гальтоном запропонована машина для випробувань на втому. А. Велер (1819–1914 рр.) продовжив дослідження в області втоми матеріалів, аналізуючи руйнування осей рухомого складу, розробив прилад для вимірювання прогинів вагонних осей на стадії їх експлуатації, запропонував установку для втомних випробувань. Він також створив прилад для статичних випробувань на згин. Великим експериментатором свого часу був В. Вертгейм (1815–1861 рр.). Коло його наукових інтересів дуже широке. Він вивчав вплив температурних умов на значення модуля пружності сталі, провів велику серію випробувань скла і різних сортів деревини, визначаючи значення коефіцієнта Пуассона, досліджував оптичні властивості пружних тіл, заклав основи для створення методів фотопружності. В подальшому у цьому напрямку працювали Ф. Нейман, Д. Брюстер, О. Ж. Френель, Д. К. Максвелл (1831–1879 рр.). У працях Д. К. Максвелла була повністю розроблена техніка оптичного методу аналізу напружень у поляризованому світлі.

Остання третина XIX ст. характеризується швидким ростом мережі спеціальних лабораторій для досліджень матеріалів та конструкцій, створюються нові типи машин для випробування і вимірювальної апаратури. До числа вчених, які отримали цікаві результати, можна зарахувати Д. Киршельда, І. Баушінгера, Л. Вердера та ін. Так, у 1875 р. на практиці використовували машину Л. Вердера із зусиллям 1000 кН і гідравлічні преси Амслера-Лаффоне. Стійкість пружних систем вивчали І. Баушінгер, Л. Тотмайер і ін. Дуже цікаві дослідження Г. Р. Герца (1857–1894 рр.), який вивчав стиснення пружних тіл, досліджував взаємодію тіл під час зіткнення.

Початок XX ст. характеризується розвитком експериментальних робіт з теорії руйнування крихких матеріалів (А. А. Гріффітс, В. Вейбула, Д. Ірвін та ін.), пластичності деформації матеріалів (Л. Прандтль, А. Кадаї й ін.), повзучості матеріалів за високих температур. Російський механік І. П. Кулібін (1735–1818 рр.) створив у 70-х роках XVIII ст. проект арочного мосту на Неві з прольотом 298,6 м. Була побудована модель цієї прольотної будови в 1/10 на-

туральної величини. Випробування моделі пройшло з успіхом, і багато років вона перекривала один з каналів у Таврійському саду Петербурга (рис. 1.5, а). Під час проектування І. П. Кулібін розробив оригінальні прилади для експериментального обґрунтування прийнятої схеми і розмірів арки (рис. 1.5, б, с) [50].

У 1808 р. у Петербурзі створюється Інститут інженерів шляхів сполучення. У стінах цього інституту працювали Г. Ляме і Ю. П. Клапейрон. Для вивчення механічних властивостей заліза Г. Ляме побудував випробувальну машину горизонтального типу, робочим органом якої був поршень гідравлічного насоса, який завантажував. Було виявлено інтенсивний розвиток деформацій під навантаженням, яке відповідало біля 2/3 руйнівного; відзначено утворення шийки після переходу за межі текучості.

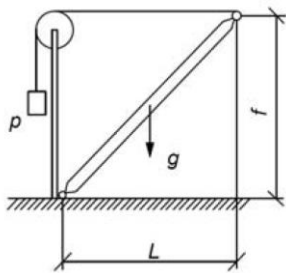
У розвиток випробування конструкцій і матеріалів значний внесок зробили інженери і вчені родом з України: П. І. Собко (1819–1870 рр.), Д. І. Журавський (1821–1891 рр.), М. А. Белелюбський (1845–1922 рр.), С. П. Тимошенко (1878–1972 рр.) та інші.

Розвиток будівництва багатоповерхових цегляних будівель супроводжувався непоодинокими випадками їх руйнування. Інженер П. І. Собко запропонував призначити висоту і товщину стін залежно від міцності цегли, для чого розробив спеціальні таблиці.

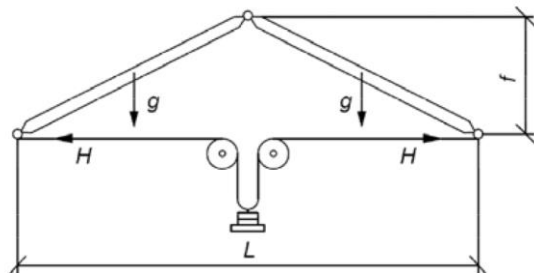
Він розробив метод визначення міцності цегли випробуванням її на перелом. П. І. Собко організував в Росії лабораторію з випробування будівельних матеріалів. Чисельні дослідження, виконані Д. І. Журавським, який успішно поєднував практичну діяльність з науковою роботою. Ним було вивчено розподіл дотичних напружень у суцільних і складених дерев'яних балках, досліджено роботу балок коробкового профілю, розподіл дотичних зусиль. Випробуючи модель ферми системи Гау, Д. І. Журавський виконав стійки зі струн і за висотою звуку, який створювали струни під час завантаження моделі, оцінював рівень навантаження цих елементів. М. А. Белелюбський вже у 20 роки очолив механічну лабораторію Петербурзького інституту шляхів сполучення і перетворив її в провідний центр випробування матеріалів і конструкцій. Так, для дослідження нового на той час матеріалу – залізобетону, він провів у 1891 році комплекс натурних випробувань 13 елементів – склепінь, труб, резервуару, моста. М. А. Белелюбський всіляко сприяв впровадженню випробувань в повсякденну інженерну діяльність, поставив питання про необхідність введення у практику випробування матеріалів єдиних міжнародних технічних умов, він сам був автором проектів понад ста мостів.



*a*



*b*



*c*

*Рис. 1.5.* Арочний міст і схеми приладів Кулібіна:

*a* – загальний вид моста; *b* – прилад для визначення залежності між розпо-  
ром і підйомом арки; *c* – прилад для визначення розпору від положення арки

У вивченні пружності суттєву роль відіграв А. Т. Купфер (1799–1895 рр.), перший директор Центральної лабораторії ваг і мір у Росії. Він дослідив значення модуля зсуву, вивчав крутильні коливання, вплив температури на модуль пружності, провів чисельні експерименти, вивчаючи згин і коливання балок. М. Ф. Окатов (1829–1901 р. р.) ґрунтовно дослідив коефіцієнт Пуассона.

Видатним інженером-практиком і обдарованим вченим був Ф. С. Ясінський (1856–1899 рр.), який на підставі аналізу руйнування прогонових будов мостів з їздою низом без вітрових горизонтальних зв'язків по верхньому поясі побудував відповідну розрахункову схему.

Можна відзначити, що у першій половині ХХ ст. наука про розрахунок і експериментальне вивчення дійсної роботи будівельних об'єктів була повністю сформована, стала наукою зі своїми методами і засобами, готова була одержати новий імпульс для розвитку з використанням сучасних досягнень фізики, математики та техніки. І. М. Рабінович у своїх працях розвивав методи вивчення впливів ди-

намічних навантажень на прогонові будови мостів. Він зробив великий внесок у науку, досліджуючи впливи короточасних імпульсних навантажень споруди. М. М. Філоненко-Бородич зосередив увагу на міцності матеріалів. Г. А. Ніколаєв очолив радянську школу зварювання. Тут слід згадати і нашого співвітчизника, знаменитого професора Б. О. Патона, який побудував перший зварний міст через Дніпро у Києві. Ю. А. Ниліндер розробив методику випробування греблі Дніпрогесу і значно вплинув на розвиток теорії неруйнівних методів. Він визначив розподіл напружень, викликаних нерівномірним підвищенням температури всередині греблі внаслідок осадки.

Великі заслуги радянських та вітчизняних вчених, що сформулювали напрямок будівельної науки, пов'язані зі створенням методів і засобів обстеження будівельних об'єктів, випробуванням моделей і споруд, створенням апаратурного обладнання. Зокрема, неможливо обійти праці таких вчених: М. М. Аїстова, О. Є. Андрейківа, А. Я. Барашикова, А. М. Бамбури, К. І. Безухова, К. А. Глуховського, Б. Г. Гнідця, О. Б. Голишева, А. Г. Григоренка, Д. Е. Долідзе, Ю. Д. Золотухіна, Ф. Є. Клименка, П. М. Коваля, С. Є. Ковчика, Л. І. Корчинського, М. А. Крилова, А. І. Лантух-Ляценка, О. В. Лужина, Й. Й. Лучка, М. Г. Мар'єнкова, В. В. Панасюка, В. Н. Помаранця, Г. Я. Почтовика, В. М. Сержюкова, Л. Н. Фомиці, С. Ф. Філоненка, Г. Л. Хасіна А. І. Яковлева та багатьох інших [128].

Унікальні вимірювальні прилади і перетворювачі створені М. М. Максимовим, М. М. Аїстовим, Й. А. Фізделем, К. П. Кашкаровим, Н. С. Вайнштоком, Н. В. Вольфом, А. М. Ємельяновим, В. Ф. Смотровим, В. А. Воробйовим, О. Ю. Саммалом, В. З. Хейфіцем й ін. У працях радянських та вітчизняних вчених успішно розвивались методи моделювання будівельних конструкцій, причому нові оригінальні результати одержані Г. Н. Покровським, Д. А. Питлюком, Н. С. Шейніним, В. Н. Мостаченко й ін. Неруйнівний контроль виробництва і якості залізобетонних виробів розвивався у роботах А. Й. Буракаса, Д. А. Коршунова, З. М. Брейтмана, В. П. Глуховського, А. М. Поліщука, Л. Г. Роде, І. Е. Школьнікова, В. В. Судакова, Б. Б. Ужполявічюса й ін.

Неможливо не відзначити видатних вчених України другої половини 20 століття, які створили одну із теорій повзучості на підставі якої розробили теорії розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій будівель і споруд при короточасних і довготривалих навантаженнях – це були такі знамениті вчені, як И. И. Уліцький, О. Б. Голишев, Я. Д. Лівшиц, і багато інших.



Неабиякий внесок у розвиток теорії міцності матеріалів і конструкції, зробив один із основоположників Львівської наукової школи механіків-матеріалознавців академік В. В. Панасюк.

Він створив основи теорії крихкого руйнування та міцності матеріалів. Разом з учнями та співавторами сформулював нові розра-хункові моделі граничної рівноваги деформівних квазікрихких тіл з тріщинами, зокрема відому тепер  $\delta_c$  – модель, що стало важливим узагальненням існуючих концепцій механіки руйнування деформівних тіл з тріщинами.

Слід відзначити відомого вченого-механіка О. Є. Андрейківа [12, 13, 48]. Він розробив методи визначення характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів під статичним, циклічним і динамічним навантаженнями, а також з урахуванням агре-сивних середовищ, зокрема водневмісних.

Значний внесок в механіку руйнування будівельних матеріалів і конструкцій зробив Й. Й. Лучко [13, 48, 61, 103, 130], наукова діяльність якого спрямована на розробку методів механіки руйнування будівельних матеріалів та конструкцій з метою прогнозування їх міцності з врахуванням реальних умов експлуатації. В процесі досліджень встановив критерій розвитку тріщин у розтягнутій зоні залізобетонних елементів, розробив методіку розрахунку параметрів тріщиностійкості для балкових залізобетонних елементів, враховуючи умови зчеплення стержневої арматури з бетоном.

Важливу роль у дослідженні та випробуванні будівель і споруд відіграли вчені Львівської політехніки. Професор М. Тульє (1853–1939 рр.) відомий своїми експериментальними дослідженнями залізобетонних конструкцій, на результатах яких формувалася класична теорія залізобетону. Модель залізобетонного арокного моста, збудована у 1892 р. (перша залізобетонна конструкція у західній Україні), до цього часу стоїть біля головного корпусу Львівської політехніки. Професор А. Курило (1889–1980 рр.), відомий експериментальними дослідженнями залізобетонних колон і арок, мостів та багатьох інших конструкцій і споруд. Під керівництвом професора Ф. Є. Клименка проведено експериментальні дослідження сталезалізобетонних конструкцій із зовнішнім стрічковим армуванням. Випробовували сталезалізобетонні балки зі звичайною та попередньо напруженою стрічковою арматурою, зовнішньою арматурою із анкерами та рифленою, балки з подвійним армуванням, нерозрізні сталезалізобетонні ригелі. Виконані унікальні експериментально-теоретичні дослідження несучої здатності, форм руйнування

і напружено-деформованого стану складчатих куполів. Великий об'єм експериментальних досліджень будівельних конструкцій виконав професор Б. Г. Гнідець. Ним випробувані нерозрізні залізобетонні балки, трипрогонові рами, великорозмірні моделі збірномолітних нерозрізних балкових і кесонних перекриттів для промислових і громадських будинків, інженерних споруд і прогонових будов мостів. Важливе значення для будівельної науки мають виконані під його керівництвом натурні випробування будівельних конструкцій: кесонних перекриттів різних розмірів.

Дуже повчальними є результати аналізу наслідків аварій і катастроф. У працях Ф. Д. Дмитрієва, Б. Н. Біляєва, В. С. Корнієнка, М. Н. Лашенка, М. М. Сахновського, А. М. Титова, А. Н. Шкінева міститься детальний аналіз причин руйнування будинків і споруд.

Строгої класифікації причин і характеру руйнувань до сьогодні не створено, але можна виявити такі об'єктивні причини, які викликають руйнування конструкцій: недостатні знання умов дійсної роботи об'єкта; помилки, допущені у процесі проектування і під час визначення величин діючих навантажень; недосконалість виготовлення і монтажу об'єкта; неправильні умови експлуатації.

## **1.7. Висновки до розділу 1**

На підставі критичного аналізу науково-технічних джерел та багаторічних натурних та модельних випробувань будівельних матеріалів, конструкцій будівель і споруд можна сформулювати такі висновки:

1. Сформульовано мету теоретичних і експериментальних досліджень та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій. Також визначено основні завдання досліджень та з'ясовано три основні задачі які розв'язують за допомогою методів і засобів випробування будівельних конструкцій будівель і споруд.

2. На підставі аналізу методів обстеження та випробування будівель і споруд сформульовано три основні етапи обстеження будівельних конструкцій і споруд, – це перше ознайомлення з проектною документацією, другий – візуальний огляд об'єкта і третій – аналіз стану конструкції будівлі чи споруди. З'ясовано також три основні задачі, які розв'язують з допомогою методів і засобів випробування, – перша задача це визначення теплофізичних і структурних параметрів міцності і деформативності, друга пов'язана з порівнянням розрахункових схем будівельних конструкцій, зусиль і переміщень, третя задача розглядає ідентифікацію розрахункової моделі.

3. Розглянуто та описано основні поняття метрології та метрологію експериментальних досліджень, – де встановлення, забезпечення експерименту та стандартизацію вимірювань. Наведено основні системи які охоплює метрологічне забезпечення.

4. З'ясовано загальні положення контролю якості матеріалів конструкцій і споруд. Зокрема, представлено основні види контролю для одержання першої інформації, та наведено декілька видів контрольних випробувань продукції. Розглянуто також основні поняття про оцінку надійності конструкцій будівель та споруд.

5. Детально описано історичний нарис розвитку методів дослідження та випробування матеріалів, будівель і споруд. Зокрема, представлено дослідження конструкцій в епоху середньовіччя і подано схеми дослідження та для встановлення та аналізу та аналіз наукових шкіл і видатних вчених які займались дослідженнями і випробуваннями будівельних матеріалів, конструкцій будівель і споруд.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСОБИ ЇХ ПРОВЕДЕННЯ**

### **2.1. Способи випробувань конструкцій**

Залежно від виду навантаження розрізняють два основні способи випробувань; статичне (під статичним навантаженням) і динамічне (під динамічним).

За величиною навантаження розрізняють два види випробувань: експлуатаційне та руйнівне. Вибір того або іншого навантаження залежить від поставленої мети.

У лабораторних умовах розрізняють натурне випробування, коли досліджуваний об'єкт виготовлений в натуральну величину, і випробування моделі.

Щодо точності отриманих результатів необхідно віддати перевагу натурним випробуванням, оскільки під час переводу результатів випробування моделі до дійсних розмірів конструкції можуть виникнути деякі похибки.

### **2.2. Силкові дії. Створення статичних навантажень**

Під час випробувань до досліджуваного об'єкта прикладається статичне або динамічне навантаження. Вибір навантаження, його схема і порядок – важливий етап підготовки експерименту, оскільки від нього залежать трудозатрати, можливість виникнення найбільш несприятливого напружено-деформованого стану конструкції [127, 128].

Статичне навантаження може створюватись власною вагою якогось матеріалу (пісок, вода і т.н.) або тиском спеціального обладнання (домкрат, камери зі стисненим повітрям та ін.)

Для зручності та точності створення навантажень необхідні такі вимоги: короткий період навантаження та розвантаження; простота та легкість цих процесів; швидкість та точність визначення навантаження під час випробування [127, 128].

Навантаження визначається вагою вантажу, що використовується: при навантаженні водою – масою води; під стисненим повітрям – тиском повітря, що фіксує манометр; при навантаженні гідродомкратами – тиском масла в системі, який вимірює манометр. Ефективний спосіб визначення зовнішнього навантаження – встановлення динамометрів стиснення або розтягу між досліджуваною конструкцією та навантаженням. Динамометри можуть бути механічними та електромеханічними. Механічні побудовані на залежності між зусиллям та деформацією пружини. Деформація пружини

перетворюється в кутове переміщення стрілки циферблата індикатора годинникового типу.

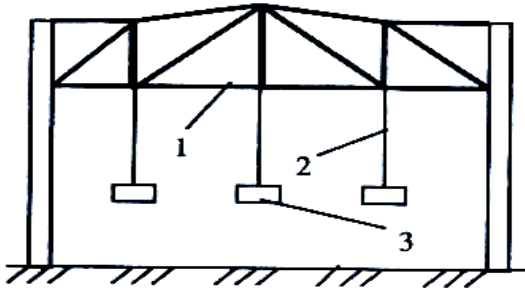


Рис.2.1. Спосіб підвішування:  
1 – ферма, 2 – підвіска, 3 – вантаж

Електромеханічні динамометри складаються з пружного сталюгого стержня, на який наклеєно тензорезистор. Відлік інформації ведеться за допомогою будь-якого реєструвального тензометричного приладу.

В лабораторних умовах під час випробування моделей чи зразків матеріалів використовують стандартне пресове обладнання та розривні машини. В натурних експериментах конструкцій зосереджені навантаження найпростіше створити підвішуванням вантажу, при цьому діюче зусилля не залежить від прогину конструкції (рис.2.1). Однак цей спосіб досить громіздкий.

Запропонована схема прикладення навантажень, яку часто застосовують у практиці, не є безпечною під час експлуатації, оскільки дослідники вимушені знаходитись під навантаженою фермою.

Для прикладання зосереджених навантажень раціональніший спосіб натягу (рис. 2.2).

При використанні натяжних пристроїв нема потреби зважувати і переміщувати вантаж; напрям прикладених зусиль може бути довільним; необхідне обладнання досить компактне; можлива швидка зміна рівня навантаження; регульоване зняття навантаження.

Для цього в ланцюг натяжного пристрою можна ввести динамометр з тензорезистором, що фіксує величину навантаження. Контролюючи покази електродинамометрів, можна автоматично контролювати і підтримувати необхідний рівень навантаження.

Недоліки цього способу такі; необхідність у випадку одночасного прикладення декількох навантажень постійно регулювати зусилля, чутливість навантажену до розвитку пластичних деформацій у конструкції під довготривалим навантаженням. Однак, цих недоліків можна позбутися під час автоматичного контролю за допомогою мікропроцесорної техніки.

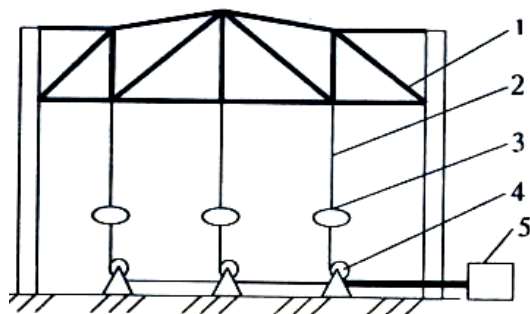


Рис.2.2. Спосіб натягу:

- 1 – ферма; 2 – підвіска;
- 3 – динамометр; 4 – блок;
- 5 – агрегат.

За схемою, зображеною на рис.2.2, можна імітувати розподілене навантаження, використовуючи зосередженим. Щоб забезпечити 10%-у похибку за моментами в середині прольоту при рівномірно розподіленому навантаженні, його можна замінити трьома зосередженими силами. Забезпечення 5%-ї похибки вимагає прикладення чотирьох зосереджених сил по всій довжині прольоту.

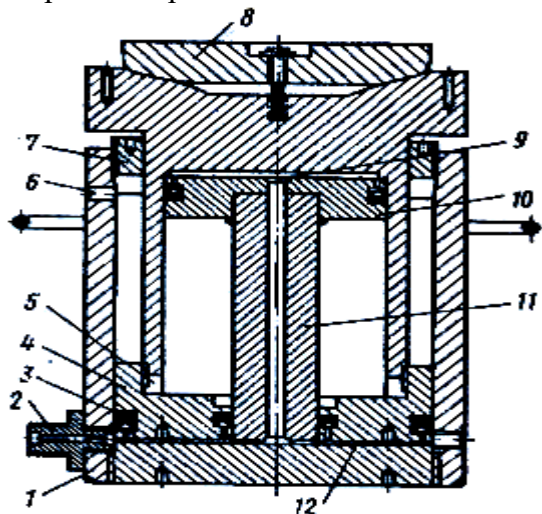
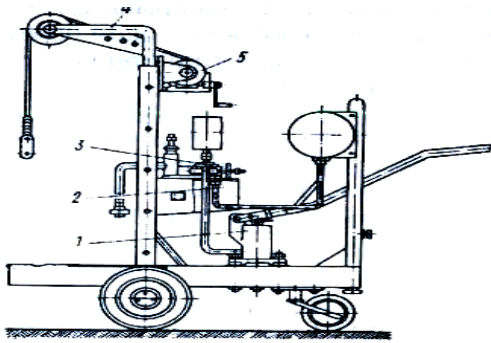


Рис. 2.3. Схема гідравлічного домкрата ДГ-100м:

- 1 – циліндр; 2 – штуцер для шланга; 3 – манжети; 4 – складний плунжер; 5, 6 – отвори для виходу повітря;
- 7 – обмежувальна гайка; 8 – сферична опора;
- 9, 12 – робочі порожнини; 10 – нерухомий поршень; 11 – порожнистий шток.

Досить часто навантаження створюють гідравлічними домкратами. У вітчизняній практиці широко використовують вантажні домкрати ДГ-200, ДГ-100, ДГ-50 (рис. 2.3). Невід’ємною частиною такого домкрата є насос, що забезпечує необхідний тиск гідросистеми (рис. 2.4).

Можливе управління гідравлічним домкратом дистанційно, що є перевагою для забезпечення охорони праці. Використовуючи в схемах навантаження конструкцій електромеханічні динамометри, можна автоматизувати контроль тиску у всіх гідравлічних домкратах, забезпечити необхідний рівень навантаження протягом всіх випробувань.



*Рис. 2.4.* Насосна станція ПСР-400 з ручним приводом: 1 – насос прямої дії; 2 – масляний бачок; 3 – розподільча коробка на три штуцери з вентилями перемикавання (пульт керування); 4 – висувальна стріла; 5 – лебідка для підйому домкрата.

### 2.3. Вимірювальні прилади для статичних випробувань

Статичні випробування характеризуються дуже повільною зміною інтенсивності зовнішнього навантаження в часі і просторі без урахування сил інерції. Тут встановлюють параметри напружено-деформованого стану конструкції для визначення деформацій, переміщень, напружень, величину моменту і величину розкриття тріщин, форми і характеру вичерпання міцності [127, 128].

Для вимірювання цих параметрів застосовують механічні, електромеханічні й електричні прилади. Найбільш точними, що вимірюють параметри в багатьох точках, дистанційно, автоматично та з мінімальними затратами, вважають електричні. Вони дозволяють повністю автоматизувати процес випробування, здійснити обробку та аналіз результатів за допомогою сучасної комп'ютерної техніки.

Механічні прилади менш точні, під час їх використання неможливо дистанційно знімати покази вимірів, вимагають додаткових заходів з техніки безпеки, процес випробування більш довготривалий і трудомісткий. Але інколи, особливо за необхідності швидкого отримання експериментальних даних, механічні прилади успішно застосовують у практиці.

Механічними й оптичними приладами вимірюють відносне переміщення фіксованих точок на поверхні конструкції. До механічних приладів, що вимірюють деформацію, відносяться: тензометри, компаратори (деформація стиску і розтягу) та зсувоміри (деформація зсуву).

**Механічний тензометр** – це прилад, який базується на принципі нерівноплечого важеля для збільшення невеликих деформацій верхнього шару досліджуваного елемента до видимих неозброєним оком переміщень стрілки. Найбільш широко використовують у практиці прилади системи Гугенбергера та Аістова (ТА-2, ТА-3) (*рис.2.5*).

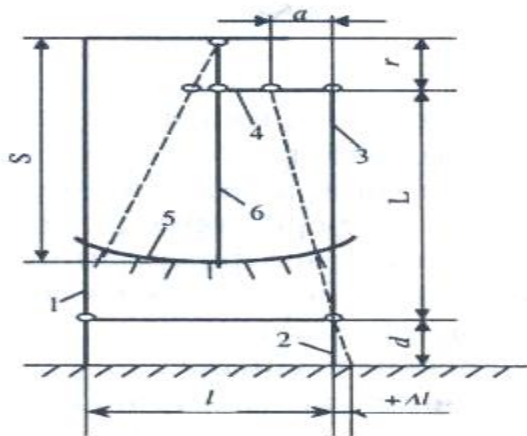


Рис.2.5. Схема механічного тензорезистора:

1 – конус, 2 – призма, 3 – важіль вертикальний, 4 – важіль горизонтальний, 5 – шкала, 6 – стрілка.

Тензометр вимірює деформацію фібрового волокна елемента, довжина якого дорівнює відстані  $l$  між призмою і конусом. Під час деформації цього волокна в межах баз  $\pm\Delta l$  призма і вертикальний важіль у разі розтягу елемента повернуться справа наліво, при стиску – зліва направо. Рух через горизонтальний важіль передається на стрілку. Вимірювану деформацію при цьому розраховують так:

$$\Delta l = \frac{1}{\left(\frac{L}{d}\right)\left(\frac{S}{r}\right)} = \Delta nm, \quad (2.1)$$

де:  $(L/d)(S/r)$  – збільшення показів приладу;  $\Delta n$  – різниця відліку за шкалою;  $m$  – ціна однієї поділки шкали.

База тензометра може мінятись в межах 20...250мм за допомогою спеціального подовжувача.

Дещо точніший **електромеханічний тензометр**, в якому елементи, горизонтальний важіль та стрілка зі шкалою замінені на мікрометричний гвинт з електроконтактною схемою сигналізації (рис.2.6).

Після закріплення тензометра на досліджуваному об'єкті початкове положення призми фіксують за допомогою контактної системи. Електричне коло замкнуте через контактну пластину та вертикальний важіль, індикатор фіксує струм у колі. Обертаючи мікрометричний гвинт, фіксуємо момент розмикання кола та робимо відлік початкового положення призми тензометра. Після навантаження конструкції призма переміститься і важіль займе відповідне положення, перемістивши в горизонтальному напрямі кон-



тактну пластину. Обертаючи гвинт до моменту, коли електричне коло розімкнеться, знімаємо показник гвинта мікрометричного, який відповідає кінцевому положенню призми. Різницю між початковим і кінцевим показниками гвинта позначимо величиною  $a$

$$\Delta l/a = d/L. \tag{2.2}$$

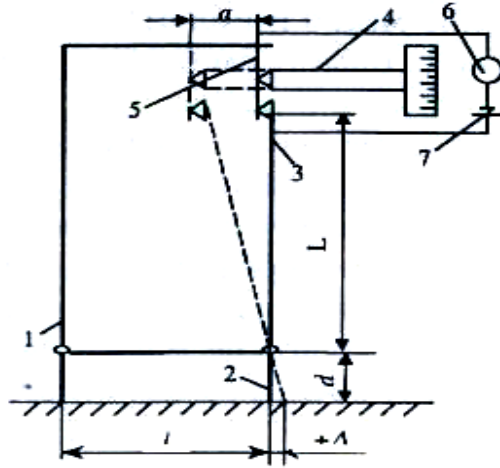


Рис.2.6. Схема електромеханічного тензометра:

- 1 – конус; 2 – призма, 3 – важіль вертикальний, 4 – гвинт мікрометричний, 5 – пластина контактна, 6 – індикатор, 7 – джерело живлення.

Найбільш точні дані про деформацію можна отримати за допомогою електричних тензометрів, які вимірюють опір, ємність, індуктивність та ін. Такий прилад складається з двох частин: тензометра, який деформується разом з досліджуванним елементом конструкції і перетворює деформацію в електричний параметр; реєструвальної частини, що фіксує зміну електричного параметра. Відомі декілька видів тензометрів: омичного опору, ємнісні, індуктивні, п'єзоелектричні, феромагнітні та ін.

Тензорезистори – найбільш розповсюджені й універсальні перетворювачі деформації твердого тіла в електричний сигнал. Принцип дії тензорезисторів полягає у здатності провідникових та напівпровідникових матеріалів змінювати омичний опір під час деформації. Ця властивість називається тензоефектом.

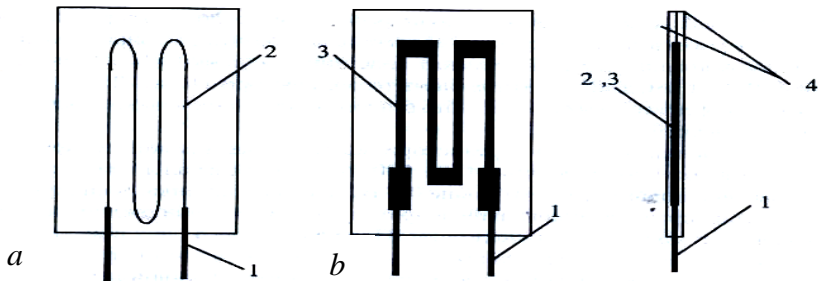
Однією з основних характеристик тензорезистора є відношення відносного опору  $\Delta R/R$  до відносної деформації  $\Delta l/l$ , яке називається коефіцієнтом тензочутливості [127, 128]:

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \tag{2.3}$$

де:  $R$  – номінальний опір тензорезистора;  $\Delta R$  – приріст опору тензорезистора зі зміною довжини на  $\Delta l$ ;  $l$  – робоча довжина тензорезистора (база).

Чутливий елемент провідникового тензорезистора виготовляють з дроту діаметром 10...25 мкм або тонкої фольги товщиною 2...5 мкм.

Чутливу частину тензорезистора наклеюють на якісний папір (основу), зверху теж наклеюють папір, ізолюючи чутливий елемент. Будова тензорезистора подана на *рис.2.7*.



*Рис. 2.7.* Будова тензорезистора:

*a* – тензорезистор з дроту; *b* – з фольги; 1 – вивід з дроту; 2 – провідник з дроту; 3 – провідник з фольги; 4 – папір.

Омічний опір змінюється тому, що під час деформації міняється довжина і діаметр дроту. Чутливу частину тензорезистора (решітку) виготовляють з високоомного дроту (сплав міді з нікелем), до кінців якої під'єднуються виводи з мідного дроту діаметром 0,15...0,3 мм.

Опір тензорезисторів, що використовуються у випробуваннях, лежить у межах 100...400 Ом. Тому залежно від діаметра та довжини дроту тензорезистори можуть бути багаторядними з різними базами. Недоліком тензорезисторів з дроту є їх поперечна тензочутливість, оскільки невелика ділянка дроту на згинах розташована в поперечному до вимірюваної деформації напрямі. Деяку похибку в результати вносить шар клею між решіткою та основою. Тензорезистори з фольги не мають цих недоліків, тому що поперечні ділянки чутливого елемента (решітки) ширші, мають значно менший опір, ніж поздовжні, і під час поперечної деформації не впливають на покази. Виготовляють такі тензорезистори витравлюванням непотрібної частини рисунка на фольгованій основі. За цією технологією виготовляють розетки тензорезисторів для вимірювання деформацій при складному напруженому етапі елемента. Це звичайні тензорезистори, розташовані в'ялоподібно, з одним спільним виво-

дом, що дозволяє виміряти деформацію по трьох напрямках і за ними визначити головну деформацію.

Коефіцієнт тензочутливості провідникових тензорезисторів залежить в основному від матеріалу дроту і може коливатись в межах від 1,8 до 6. Основний розмір (база) тензорезисторів нормований – 5; 10; 20; 30; 50; 75; 100; 200мм. Під час випробовувань металоконструкції використовують бази до 20 мм, а бетонних – 50...200 мм.

До позитивних якостей тензорезистора відносяться: можливість безпосередньої реєстрації деформацій як на поверхні, так і всередині конструкції; висока точність і можливість вимірювання деформацій на всіх ступенях навантаження, аж до текучості матеріалу конструкції; порівняно простота розташування давача на досліджуваній конструкції і можливість встановлення його в місцях, недоступних для механічних приладів; можливість дослідження деформацій різних деталей і елементів конструкції під статичними і динамічними навантаженнями; відносна простота і дешевизна виготовлення; мала маса та розміри.

Одночасно провідникові тензорезистори мають ряд недоліків: недостатньо висока електрична чутливість, що зумовлює необхідність використання складної реєструвальної апаратури; понижена чутливість за малої бази; чутливість до змін температури; вживання тензорезистора лише один раз.

Найбільш високочутливими є напівпровідникові тензорезистори. їх виготовляють з монокристалів кремнію або германію. Перпендикулярно головній кристалографічній площині вирізають пластини товщиною 0,05... 0,1 мм, шириною 0,5... 1 мм, з яких виготовляють тензорезистори з базою 2... 15 мм. їх можна використати без основи, тобто безпосередньо приклеювати до досліджуваної поверхні.

Напівпровідникові тензорезистори мають дуже високий коефіцієнт тензочутливості, який досягає 150...200. Вихідний сигнал з такого давача набуває значної амплітуди (більше 0,1 В), що дає можливість використовувати стандартну вимірювальну апаратуру. Однак, напівпровідникові тензорезистори мають суттєві недоліки. Початковий опір і чутливість залежать від температури; високий температурний коефіцієнт опору; обмежений діапазон деформування; чутливість залежить від рівня деформації. Для зменшення цих залежностей необхідна температурна компенсація, що и свою чергу зумовлює використання складної реєструвальної апаратури.

Кращих результатів стосовно точності вимірювання деформацій досягнуто методом, оснований на використанні п'єзоелектричного ефекту. З цією метою застосовують тензодавачі, виготовлені з матеріалу, що має п'єзоелектричні властивості (кварц, титанат барію та ін.) (рис.2.8).

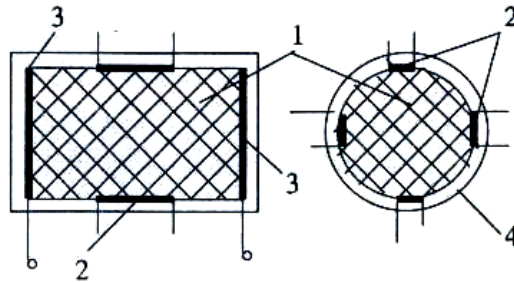


Рис.2.8. Конструкція п'єзоелектричного перетворювача:

1 – пружний елемент; 2 – тензодавачі; 3 – електроди; 4 – корпус.

Пружний елемент виготовлений з п'єзокераміки, на його бокових поверхнях наклеєні тензорезистори (тензодавачі), а на торцевих прилаштовані електроди для підведення напруги.

Вимірюють деформацію середовища тензометром та її п'єзоелектричним перетворювачем, які розташовані на одній осі в напрямі дії напружень. За відсутності напружень тензодавачі перетворювача балансуються разом з тензодавачами тензометра. Зі збільшенням напружень у зоні розташування перетворювача з'являється їх концентрація, тому балансування порушується. Сигнал розбалансування, надійшовши на прилади, виробляє електричну напругу, яка подається на електрод перетворювача. Під дією електричної напруги внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту пружний елемент отримує додаткову деформацію, рівну різниці деформацій тензометра та п'єзоелектричного перетворювача. Завдяки цьому балансування відновлюється і система стає рівноважною. Електрична напруга, за якої розбалансування ліквідується, пропорційна вимірюваному напруженню і є його мірою [27, 128].

Точність вимірювання деформацій залежить від багатьох факторів: розміру бази вимірювання; підготовки поверхні елемента конструкції; додержання технології наклеювання тензорезистора; гідроізоляції тензорезистора; комутації; перевірки опору між решіткою тензорезистора та поверхнею конструкції.

Поверхні для наклеювання тензорезисторів готують так: металеву поверхню зачищають від фарби, іржі, гарту за допомогою кар-

борундових брусків, шліфувального паперу, далі її знежирюють ацетоном та спиртом. Бетонну поверхню очищають від пороху, бруду тощо, шліфують карборундовим бруском. Раковини заливають гіпсом, після висихання якою ділянку наклеювання знову зачищають шліфувальним папером до отримання гладкої поверхні, знежирюють.

Рекомендації з наклеювання тензорезисторів залежать від його типу, виду основи, клею, можливості створення притискальних зусиль на тензорезистор під час наклеювання, можливості гарячого тверднення клею. Найоптимальніша товщина клеючого шару – до 0,2 мм, при цьому деформації поверхневого шару конструкції та тензорезистора рівні.

Якість проклеювання всієї поверхні тензорезистора має великий вплив на похибку вимірювання. За наявності непроклеєних місць деформація решітки тензорезистора відрізняється від деформації поверхневого шару елемента конструкції і внаслідок цього виникають додаткові похибки.

Клеї повинні мати хорошу адгезію (прилипання) до матеріалу основи тензорезистора та матеріалу поверхні, стабільні та високі діелектричні властивості, термогідростійкість. До таких відносять: кремнійопітрогліфталеві, фенолформальдегідні, карбінольні та сті-ракрил.

Волога негативно діє на роботу тензорезистора, міняє фізико-механічні та ізоляційні властивості основи і створює можливість витікання струму. Існує декілька способів захисту тензорезистора від неї. Всі способи мають задовольняти такі вимоги: захисний засіб не повинен викликати деформацію тензорезистора, а також впливати на вимірюваний фактор, тобто механічна міцність захисного матеріалу повинна бути якомога мінімальною. Одним з шляхів захисту є покриття тензорезистора ізоляційним матеріалом, яким може бути вазелін, віск, карбінольно-цементна паста.

Після приклеювання та гідроізоляції тензорезистора необхідно перевірити якість ізоляції клеєвого шару, вимірюючи його опір мегомметром. При статичних випробуваннях опір клеєвого шару має бути не менше 50 МОм. За менших значень не виключена можливість витікання струму, що може дати невірні результати.

**Реєструвальна апаратура.** Для реєстрування (вимірювання) зміни омичного опору тензорезистора під дією деформації, що виникає в досліджуваній конструкції, використовують мостові схеми. На *рис. 2.9* представлено принципову схему вимірювального приладу, що працює за принципом моста Уїтстона.

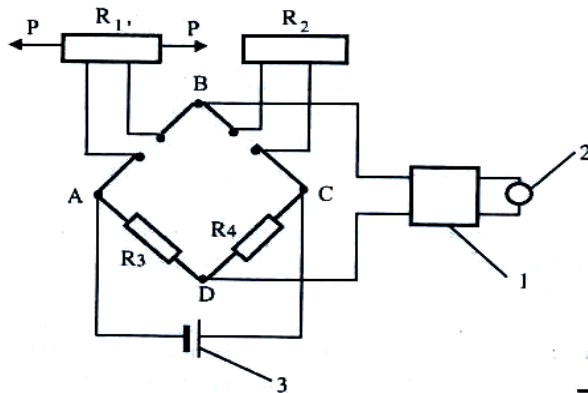


Рис. 2.9. Припцива схема вимірювання:

1 – підсилювач; 2 – реєструвальний елемент; 3 – джерело живлення;  $R_1$  – робочий тензорезистор;  $R_2$  – компенсувальний тепзорезистор;  $R_3$ ;  $R_4$  – резистори балансування моста.

Міст складається з чотирьох плечей (опорів): в одну його діагональ  $BD$  під'єднаний реєструвальний елемент, а в другу  $AC$  - джерело струму. Робочий тензорезистор  $R$ , наклеєний на досліджувану конструкцію, є одним з плечей моста. В друге плече під'єднують компенсаційний (температурний) тензорезистор  $R_2$  який аналогічний робочому, але на відміну від нього не підлягає деформації. Для забезпечення однакового температурного режиму обидва тензорезистори встановлюють неподалік один від одного. При зміні температури в них виникають однакові температурні деформації, а відповідно, й однакові зміни опору. Оскільки вони під'єднані в суміжні плечі моста, це не розбалансиує його і, відповідно, деформації, викликані зміною температури, не вплинуть на результати вимірювання.

Покази робочого тензорезистора вимірюють безпосередньо або нульовим методом.

Під час безпосереднього вимірювання зміна опору робочого тензорезистора, викликана деформацією його решітки, визначається за зміною струму в діагоналі  $BD$  моста. Цей метод можна використати як при статичних, так і динамічних випробуваннях. Тут використовують схему неврівноваженого моста, живлення якого здійснюють постійним або змінним струмами.

Під час випробувань величини деформацій, а відповідно, і зміни опорів тензорезистора незначні, тому необхідна високочутлива реєструвальна апаратура. Для збільшення величини вихідного параметра моста додатково використовують підсилювач.

Вимірюють так: до завантаження конструкції шляхом зміни резисторів  $R_3$  та  $R_4$  міст балансують. В діагоналі моста струм не протікає, що фіксує реєструвальний елемент. Після завантаження конструкції тензорезистор деформується, міняється його опір, міст розбалансовується і в його діагоналі починає протікати струм. Шкалу реєструвального приладу можна проградувати у відповідних одиницях деформації.

Для вимірювання деформацій методом нульового вимірювання використовують схему урівноваженого моста (рис. 2.10).

Вимірюють деформацію цим методом так. До завантаження конструкції за допомогою реохорда балансують міст (реєструвальний елемент фіксує відсутність струму в діагоналі моста) і знімають перший показник зі шкали реохорда. Після завантаження конструкції змінюється опір активного тензорезистора, баланс моста порушується. Зі зміною повзунка реохорда міст знову балансується. Знімається другий показник зі шкали. За різницею цих двох показів визначають величину деформації. Шкала реохорда градуйована у відповідних одиницях.

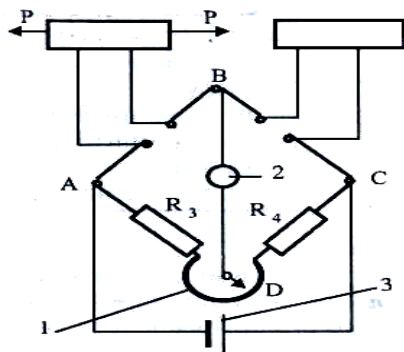


Рис.2.10. Принципова схема вимірювання:

1 – реохорд; 2 – реєструвальний елемент, 3 – джерело живлення;

$R_1$  – робочий тензорезистор;  $R_2$  – компенсуючий тензорезистор,  $R_3$ ;  $R_4$  – опори плечей моста.

До реєструвальних приладів для статичних та динамічних випробувань відносяться ІСД-2; ІСД-3; ІД-62; АІД-2М; УТС-1-ВТ-12; АТ-5; ЦТМ-3; ЦТМ-5; ЦТУ-1; АР-2; КСТ-4 та ін.

Можливе використання іншої електронної апаратури, в тому числі і стандартної. Так, завдяки застосуванню як реєструвальних приладів електронного потенціометричного моста ЕПМ (виробник з-д "Мукачівприлад") та автоматичного комутатора АКТ-36 вирішили проблему відсутності спеціальної апаратури. Однак комутуючі засоби

з механічною контактною системою вносять у результати вимірювання додаткові похибки внаслідок перехідного опору між контактами. Цей недолік можна ліквідувати за допомогою сучасних електронних перемикачів, виконаних на мікросхемах.

У лабораторних умовах можливе вживання інших видів тензометрів. оптико-механічні тензометри являють собою удосконалений механічний тензометр, в якому механічну систему важелів та стрілки замінено на дзеркально-оптичну, де функцію стрілки виконує світловий промінь.

З урахуванням фізичної властивості сталюї струни під час розтягування міняти частоту власних коливань розроблено принцип струнного тензорезистора (рис.2.11).

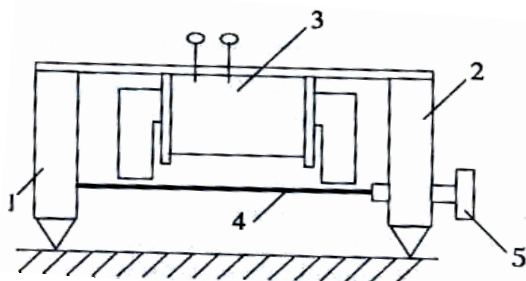


Рис.2.11. Схема струнного тензометра:

1 – конус; 2 – рухома призма; 3 – електромагніт; 4 – струна; 5 – гвинт натягу струни.

З деформацією елемента змінюється і відстань між конусом та рухомою призмою тензометра, що в свою чергу змінює натяг струни, а відповідно, і частоту її коливань. Струнний тензометр працює в двох режимах: збудження коливань і реєстрації частоти коливань. Спочатку до електромагніту підводять імпульс постійного струму струна притягується до магніту і відпускається, тобто збуджуються вищі коливання. Потім електромагніт переключасться на вхід підсилювача і працює як індукційний перетворювач. При цьому вихідним параметром є не амплітуда, а частота. Ця особливість забезпечує високу завадостійкість сигналу і передачу його без спотворень на далеку відстань. Область використання струнних тензометрів – довготривалі вимірювання деформацій.

Таку ж саму функцію при довготривалих випробуваннях виконує механічний прилад – **компаратор**.

Компаратори залежно від принципу роботи і конструктивної схеми бувають механічними та оптичними. їх встановлюють на



конструкцію лише в процесі зняття відліків. Принцип полягає в порівнянні відстані між двома рисками або мітками на конструкції, нанесеними до завантаження, та після навантаження. Різниця між ними і є величиною деформації.

Деформацію зсуву виміряють **зсувомірами**. На практиці використовують зсувоміри Аістова та Штейгера. Останній призначений для вимірювання зсуву металевих конструкцій. Зсувомір Аістова являє собою видозмінений тензометр Аістова і має три опорні точки.

Нехай необхідно виміряти зсув між волокнами 1 – 1 та 2 – 2 елемента (рис.2.12).

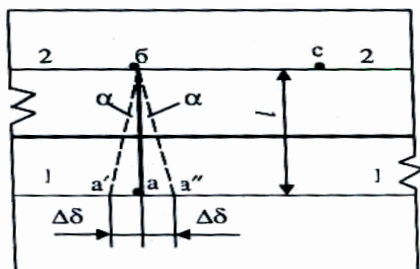


Рис.2.12. Розрахункова схема зсувоміра

На волокно 1 – 1 поміщають опір "а", а на волокно 2 – 2 - опори "б" та "с" тензометра. Під час взаємного зсуву цих двох волокон опора "а" переміститься на  $\Delta\delta$  в точках "а'", або в "а''".

Для вимірювання лінійних зміщень широко використовують механічні прилади: **прогиноміри** (вимірювання прогину); **клинометри** (вимірювання кутових зміщень). До перших відносяться барабанно-шестерневий та рейково-шестерневий механізми.

Барабанно-шестерневий механізм з дротяним зв'язком (рис.2.13) – це прогиноміри систем Максимова (ПМ-2, ПМ-3), Аістова (ПАО-5, ПАО-6), Ємельянова, Гріо, Рішара, Амслера та ін.

Рейково-шестерневі прогиноміри, або індикатори годинникового типу, використовують для вимірювання невеликих за величиною переміщень, їх встановлюють на досліджувану конструкцію і впирають рухомим стержнем у якусь нерухому точку, не зв'язану з конструкцією. Тому їх називають контактними (рис. 2.14).

Контактні прогиноміри характеризуються порівняно високою точністю вимірювання деформації (0,01мм), невеликими габаритами і масою. Під час вимірювань переміщень широко використовують тензометричні перетворювачі різних типів – індуктивні, ємнісні, резисторні.

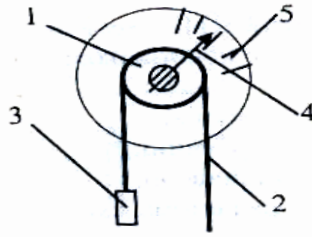


Рис 2.13. Схема прогиноміра:  
1 – барабан, 2 – дріт, 3 – вантаж, 4 – стрілка, 5 – шкала.

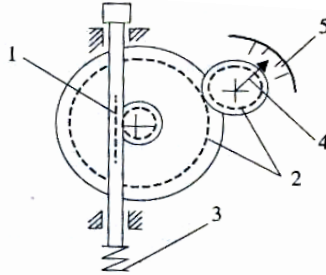


Рис.2.14. Схема контактної прогиноміра:  
1 – шток з нарізкою зубів; 2 – система зубчастих коліс, 3 – пружина,  
4 – стрілка, 5 – шкала.

Індуктивні можуть бути дросельного, соленоїдного та трансформаторного типів. Дросельний перетворювач зі змінною повітряною щільною подано на рис. 2.15.

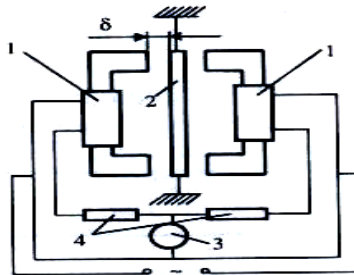
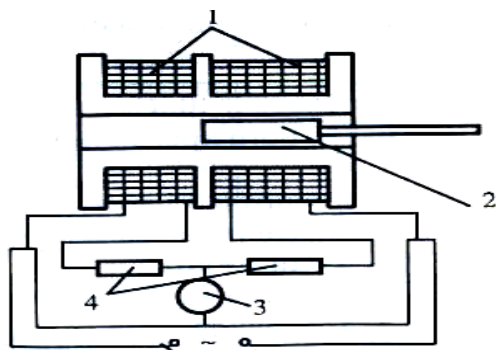


Рис.2.15. Схема дросельного перетворювача:  
1 – котушки; 2 – сердечник; 3 – індикатор; 4 – резистори схеми.

Котушки живляться генератором змінного струму; під час переміщення сердечника (зміни щільності) міняється індуктивність контуру, а значить, реактивний опір котушки. Діапазон вимірювання переміщень таким перетворювачем невеликий, від 0,1 до 1мм, але поріг чутливості сягає від 0,1 до 0,2мкм. Для значних переміщень використовують перетворювач соленоїдного типу (рис.2.16).

Зміна індуктивності таким перетворювачем викликається переміщенням у котушці феромагнітного сердечника. Трансформаторні індуктивні перетворювачі відрізняються від дросельних вторинною обмоткою, в якій індукується електрорушійна сила. Величина індукованої напруги залежить від зміщення замикальної пластини трансформатора (величини щілини).

Недоліком індуктивних перетворювачів є їх чутливість до багатьох зовнішніх факторів: зміни напруги і частоти генератора, зміни магнітної проникливості повітряної щілини, впливу зовнішніх магнітних полів та ін. Для компенсації цих факторів використовують диференціальні або мостові схеми включення котушок перетворювача.



*Рис. 2.16.* Схема перетворювача соленоїдного типу:  
1 – котушка; 2 – сердечник; 3 – індикатор; 4 – резистори схеми.

В ємнісних перетворювачах застосовують залежність віддалі між пластинами конденсатора та його ємністю. Конструктивно одна з пластин конденсатора нерухома, закріплена незалежно від досліджуваної конструкції, друга – безпосередньо зв'язана з конструкцією і переміщається разом з нею, міняючи таким чином ємність давача.

Для вимірювання кутових переміщень використовують клинометри. За принципом дії розрізняють важельні та клипометри, основою яких є рівень.

Важельний клинометр найбільш простий для вимірювання кутових переміщень з достатньою точністю. Він складається з металевого важеля, закріпленого на об'єкті, та двох прогиномірів з д्रो-тяним зв'язком (*рис.2.17*).

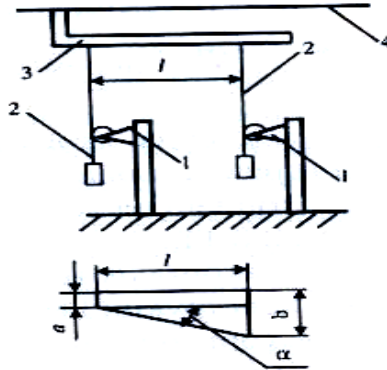
Перед завантаженням конструкції на прогиномірах беруть відліки  $N_1$  та  $N_2$ , а після завантаження -  $N_1'$  та  $N_2'$ .

Тангенс кута повороту перерізу визначається за формулою:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b-a}{l}, \quad (2.4)$$

де:  $a = N_1 - N_1'$  – переміщення точки А;  $b = N_2 - N_2'$  – переміщення точки В

Клинометр, в основі якого високочутливий горизонтальний рівень (клинометр Стоппані), схематично подано на *рис. 2.19*.



*Рис.2.18.* Схема важельного клинометра:  
1 – прогиномір; 2 – дріт(тросик); 3 – важіль; 4 – конструкція.



*Рис.2.19.* Схема роботи кинометра:  
1 – конструкція; 2 – бульбашка; 3 – рівень; 4 – гвинт мікрометричний

Клинометр закріплюють у заданому перерізі конструкції і встановлюють рівень горизонтально (повітряну бульбашку суміщають з рискою). Рівень шарнірно закріплений до конструкції; його переміщують відносно конструкції мікрометричним гвинтом, градуйованим в градусах. Після завантаження рівень гвинтом знову встановлюють у горизонтальне положення. Різниця відліків до і після завантаження є кут повороту перерізу.

#### 2.4. Динамічні навантаження

На конструкції під час експлуатації діють динамічні навантаження (*рис. 2.20*), тобто такі, в яких міняється або величина, або точка прикладення. Розрізняють три основні види динамічного навантаження [127, 128]:

- 1) нерухоме вібраційне, змінне за величиною, що прикладене

в одній точці. Воно виникає в результаті роботи різних механізмів з неврівноваженими масами;

2) ударне в якійсь визначеній точці. Таке навантаження може виникати при падінні різних тіл, під час роботи копра, молота тощо;

3) рухоме вібродинамічне, що являє собою комбінацію вищезгаданих двох видів, точка прикладення яких міняється.

Динамічні випробування характеризуються досить швидкою зміною інтенсивності зовнішніх навантажень в часі або просторі, при цьому впливають сили інерції. Під час динамічних випробувань визначають параметри, що оцінюють напружено-деформований стан конструкції: амплітуду, частоту, швидкість коливань, їх замикання, а також деформацію. На *рис. 2.21* показані способи створення динамічної дії на конструкції. Найбільш часто використовують ударне або вібраційне навантаження.

**Ударне навантаження.** Тут вживають різні схеми. Ударне навантаження можна створити вільним падінням вантажу на конструкцію. Однак при цьому вантаж разом з конструкцією приходить у коливальний рух і впливає на частоту власних коливань останньої. Цього недоліку позбавлена схема, коли вантаж підвішено до конструкції. Його в потрібний момент миттєво знімають (відчеплюють). Звільнена від навантаження конструкція починає вільно коливатись. Недоліком такої схеми є те, що необхідно збільшувати вагу вантажу.

В практиці є випадки, коли виникає потреба у горизонтальних ударних навантаженнях. Тут можна використати стандартну установку – копер. В останній час для цього почали застосовувати піропатрони невеликої потужності.

**Вібраційне навантаження.** Для створення і передачі конструкції різних за напрямком, частотою та амплітудою вимушених коливань, а також моменту змінної величини і напряму використовують спеціальну установку – вібромашину.

Вібромашина складається з парної кількості дисків з дзеркально розташованими неврівноваженими масами, що обертаються в різні боки. Обертання здійснюється електродвигуном, кількість обертів якого  $i$ , відповідно, частота вимушених коливань конструкції міняються у широких межах. Під час обертання дисків виникають відцентрові сили, які можна розкласти на вертикальну і горизонтальну складові. Горизонтальні в будь-який момент часу напрямлені в протилежні боки і взаємно врівноважуються. Вертикальні додаються і створюють пульсуючу силу, величина якої міняється за законом синуси (*рис. 2.21, г*).

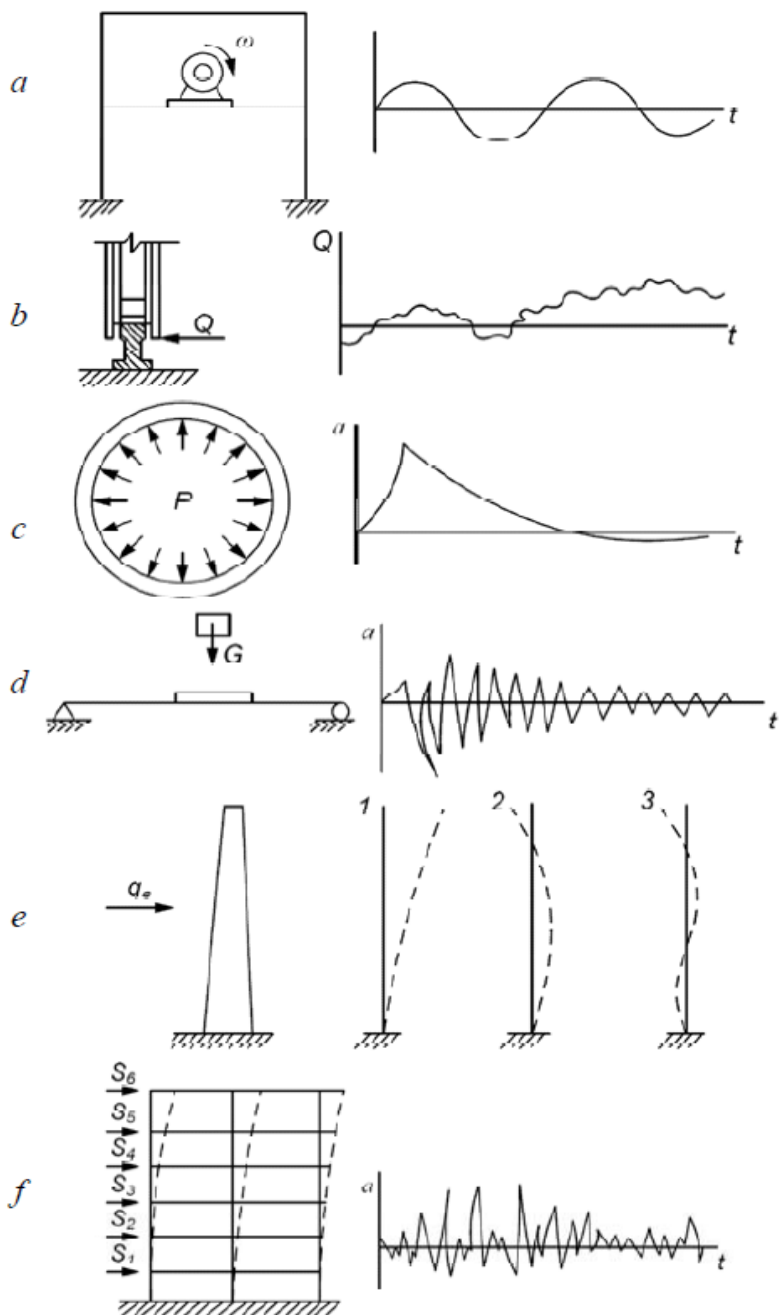


Рис.2.20. Види динамічних навантажень та викликані ними коливання: *a* – нерухоме вібраційне; *b* – рухоме від поперечних сил; *c* – імпульсне за раптової зміни тиску; *d* – ударне; *e* – коливання димоної труби від вітру; *f* – сейсмічне: 1-3 – форми коливань, при яких втрачається стійкість стержня.

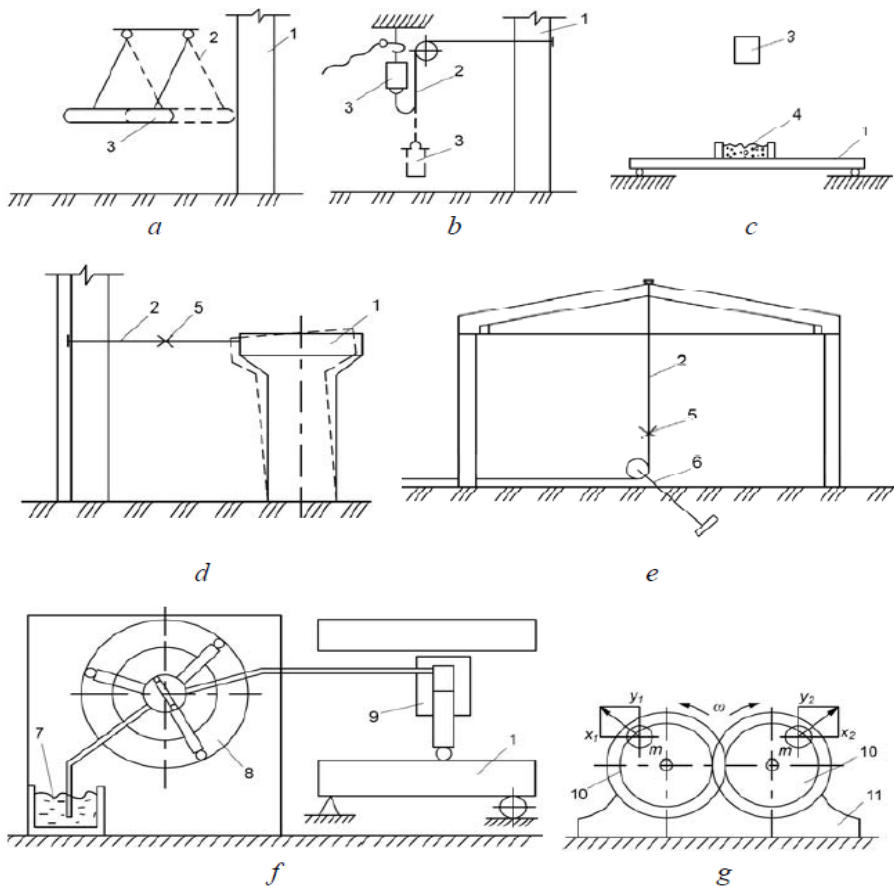


Рис.2.21. Способи створення динамічної дії:

*a* – таран; *b* – скидання вантажу (горизонтальне навантаження); *c* – скидання вантажу на конструкцію (вертикальне навантаження); *d*, *e* – зворотний удар – обрив відтяжки; *f* – вібродомкрат; *g* – вібромашина: 1 – конструкція, що випробовується; 2 – підвіска; 3 – вантаж; 4 – пісок; 5 – місце обриву в відтяжці; 6 – анкер; 7 – масло; 8 – плунжерний барабан; 9 – гідропульсатор; 10 – маси з ексцентриками, що обертаються; 11 – станина.

Вібромашина такої конструкції може створювати навантаження від нуля до  $P$ . Регулювати вібраційну силу, створювану машиною, можна, змінюючи неврівноважені маси та радіус їх кріплення на дисках.

## 2.5. Вимірювальні прилади для динамічних випробувань

Під час випробувань необхідно визначити параметри, які використовуються для оцінки напружено-деформованого стану конструкції: амплітуду, частоту, прискорення, швидкість коливань, їх

замикання, а також деформації. Прилади для визначення цих параметрів повинні забезпечувати можливість або взяття відліків за шкалою, або запису коливань, щоб при подальшій їх обробці визначити необхідні параметри.

Залежно від зв'язку з досліджуваною конструкцією прилади розділяють на дві групи: контактні і дистанційні. Контактний або сам встановлюють на конструкцію, або на ній закріплюють виводний елементдавач. Більшість сучасних вібровимірювальних приладів конструюють саме за останнім принципом [41].

До дистанційних підносять спеціальні кіно- та відеозмінювальні камери:

- фототіньові та фотоелектронні прилади, а також взаємоіндукції та вихрових струмів.

Механічні прилади реєструють коливання такі:

- вібрографи – заміряють і записують лінійні переміщення предмета, що коливається;

- сейсмографи – записують коливання ґрунту від землетрусів чи вибухів і мають точність, більшу від вібрографів;

- торсіографи – заміряють крутильні коливання;

- велосіографи – заміряють і записують швидкості тіл, що коливаються;

- акселерографи – заміряють і записують прискорення тіл, що коливаються.

Електричні прилади для запису коливальних процесів досконаліші проти механічних, точніші, можливі впливи інерції та дистанційне зняття параметрів у багатьох точках, менш трудомісткі.

Вони складаються із первинних (вібродавачів) та вторинних (записувальних та реєструвальних) пристроїв. Вібродавачі встановлюють на конструкцію. Вони перетворюють механічні коливання в зміни електричних параметрів, які реєструються вторинними приладами. Вторинними приладами є осцилографи (шлейфові, електронні, струменеві), магнітографи, швидкодійні самозаписувальні прилади. Значно розширюються можливості вимірювання завдяки використанню ПК, що дозволяє не тільки фіксувати параметри коливань, але й обробляти та аналізувати результати з допомогою спеціальних програм.

Найпростіша для вимірювання амплітуд є вібрмарка (рис.2.22, а). Її креслять на цупкому папері у вигляді трикутника з основою  $H = 5-20$  мм і довжиною  $L$ , в 10 разів більшою за основу. По висоті, паралельно основі, трикутник розділений паралельними лініями на 10 частин. Вібрмарка наклеюється на конструкцію, що



коливається в напрямку стрілок. При частоті коливань більше 7 Гц чіткість ліній зникає і дослідник може заміряти віддаль  $l$  до перетину здвоєних трикутників, а потім визначити розмах коливань (амплітуду) за формулою

$$A = lH/2L. \quad (2.5)$$

Вібромарка дозволяє вимірювати постійну амплітуду коливань від 1 до 20 мм при частоті 7...15 Гц. Для заміру малих амплітуд порядку 0,1...0,2 мм на чорний папір наклеюють тонкий блискучий дріт і освітлюють яскравим світлом. Ширину розмитого зображення міряють з допомогою мікроскопа.

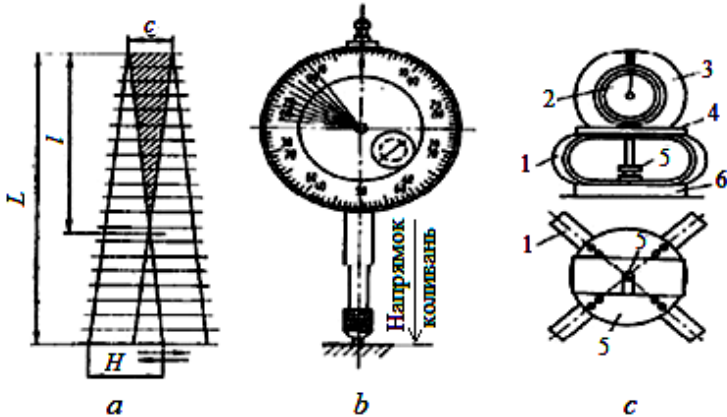


Рис.2.22. Механічні прилади для динамічних випробувань:  $a$  – вібромарка;  $b$  – індикатор;  $c$  – амплітудомір; 1 – пружини; 2 – індикатор; 3 – масивне кільце; 4 – диск; 5 – мікрометричний гвинт; 6 – основа.

Постійну амплітуду коливань можна заміряти індикатором годинникового типу (рис.2.22,  $b$ ). Його кріплять до нерухомої точки, не зв'язаної з конструкцією, так, щоб шток впирався в поверхню конструкції паралельно її коливанням. Розмах коливань, рівний подвоєній амплітуді  $2A$ , вираховують за шкалою приладу, на якій з'являється затемнений сектор (за крайніми положеннями стрілки).

Амплітудомір А.М. Ємельяпова і В.Ф. Смотров (рис.2.22,  $c$ ) складається із масивного кільця 3, що є інерційною масою і опирається на диск 4, закріплений до основи 6 чотирма стрічковими пружинами 1. В кінець кільця вставлений індикатор 2, шток якого впирається в мікрометричний гвинт 5, встановлений на нижньому диску 6. Частота власних коливань інерційної маси приладу 2,5 Гц. Прилад ставлять на поверхню конструкції, індикатор можна вважати закріпленим нерухомо і за крайніми відхиленнями його стрілки, яка створює затемнений сектор, визначити амплітуду коливань.

Багатоязичковий частотомір Фрама (рис.2.23, а) складається із набору пластинок з вантажами на кінцях, змонтованих на загальній підставці. Пластинки мають різну довжину. Залежно від їх розміру і ваги вантажів кожна з них має деяку частоту власних коливань. Ці частоти підібрані так, щоб перекрити певний діапазон.

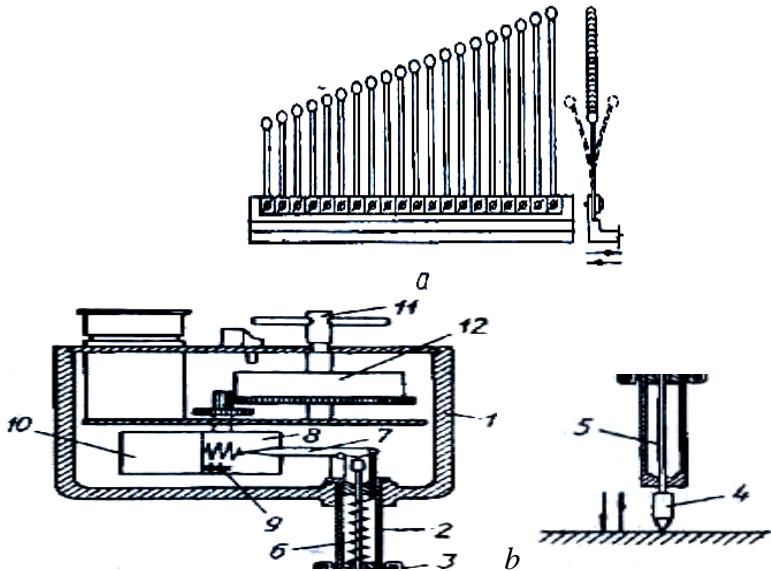


Рис.2.23. Механічні прилади: а – частотомір; б – ручний віброграф: 1 – корпус; 2 – трубка; 3 – гвинт (стопор); 4 – конусоподібний наконечник; 5 – стержень; 6 – пружина; 7 – загострений важіль; 8 – восковий папір; 9 – визначник часу; 10 – касета; 11 – ручка; 12 – стрічко-протяжний механізм.

На досліджуваній конструкції частотомір встановлюють так, щоб напрямок коливань був перпендикулярний пластинкам. Під час коливань конструкції разом з нею коливається частотомір. Якщо частота коливань конструкції знаходиться в діапазоні вимірів приладу, відповідна пластинка попаде в резонанс, її амплітуда помітно відрізняться від інших. На кожній пластинці маркована її власна частота. Частота коливань конструкції рівна власній частоті пластинки, яка найсильніше коливалась. За однакової вібрації двох пластинок частота коливань конструкції знаходиться між ними. Якщо жодна пластина не потрапляє в резонанс, то це значить, що частота коливань знаходиться за межами вимірювального діапазону і необхідно використати частотомір з іншим діапазоном частот.

Ручним вібрографом (рис.2.23, б) міряють амплітуди коливань від 0,05 до 6 мм з масштабом 6:1, 2:1, 1:1 при частоті 5...100 Гц. Інерційною є маса приходу. Віброграф тримають в руках чи вста-

новлюють на штативі так, щоб напрямком коливань збігався з повздовжньою віссю рухомого стержня, а наконечник впирався в точку конструкції, коливання якої записують. Записують віброграми на червоній восковій стрічці шириною 25 мм гострим металевим пером, з'єднаним з важелем. Відзначник часу працює від внутрішньої батареї чи зовнішнього джерела струму і наносить на стрічку мітки із заданим інтервалом 1с.

Найбільш досконалим механічним приладом контактного типу вважають віброграф Гейгера (рис.2.24).

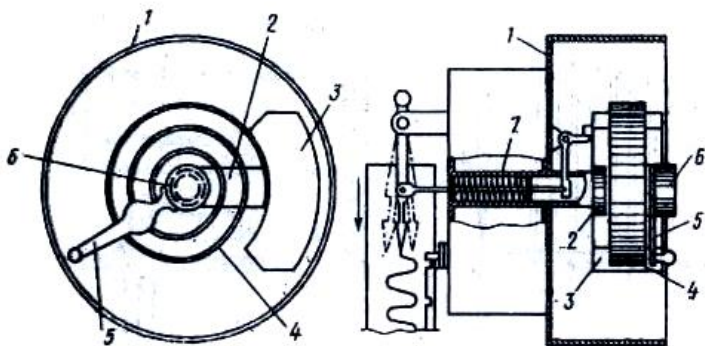


Рис.2.24. Схема вібрографа Гейгера:

1 – корпус; 2 – планка; 3 – інерційна маса; 4 – спіральна пружина; 5 – ручка; 6 – втулка; 7 – трубка.

Принцип його роботи оснований на коливанні корпусу, з'єданого системою важелів із стрілкою, відносно нерухомої інерційної маси, яка утримується в заданому положенні й спіральною пружиною. Віброграму записують пером на паперовій стрічці шириною 50 мм, що рухається. Стрічка зрушується годинниковим механізмом з ручним заводом і плавним регулюванням швидкості в межах від 0,5 до 2 і від 5 до 20 см/с при двох положеннях перемикача. Амплітуда від 0,05 до 10 мм записується зі збільшенням в 3–12 разів з похибкою до 5% в інтервалі частот 2,5...300 Гц. Відзначник часу працює з інтервалом в 1с від приводу стрічкопротяжного механізму або з меншим інтервалом від зовнішнього джерела.

Електричні прилади є багатоканальними, швидкодійними і точнішими, ніж механічні. В них здавачі – перетворювачі під час коливань виробляють сигнали, які по дротах передаються на осцилограф, магнітограф, самописець або комп'ютер.

Деформації під час динамічних випробувань можна заміряти звичайними тензорезисторами, які використовують і при статичних

випробуваннях. Схема установки датчиків (тензорезисторів) при динамічних випробуваннях також мостова, одна діагональ з'єднана джерелом струму, а в іншу послідовно підключений тензорезистор. Відмінність в тому, що індивідуальне перетворення сигналу від кожного тензорезистора необхідно в один момент часу, а не послідовно, як при статичних випробуваннях. Тому для кожного тензорезистора слід встановлювати свій тензопідсилювач [41].

Перед випробуваннями необхідно провести градування тензорезисторів. На фотопапері осцилографа записують градувальний сигнал від кожного тензорезистора, за яким надалі оцінюють їх деформацію.

Генераторні (енергетичні) вібродавачі створюють електро-рушійну силу під час зміни неелектричних величин. Вони діляться на індукційні (магнітоелектричні), п'єзоелектричні, фотоелектричні, термоелектричні (рис.2.25, а, б).

Параметричні датчики перетворюють зміну неелектричної величини в зміну електричних параметрів. До них відносяться індуктивні, ємнісні, омичного опору й акустичні (рис.2.25, с-ф).

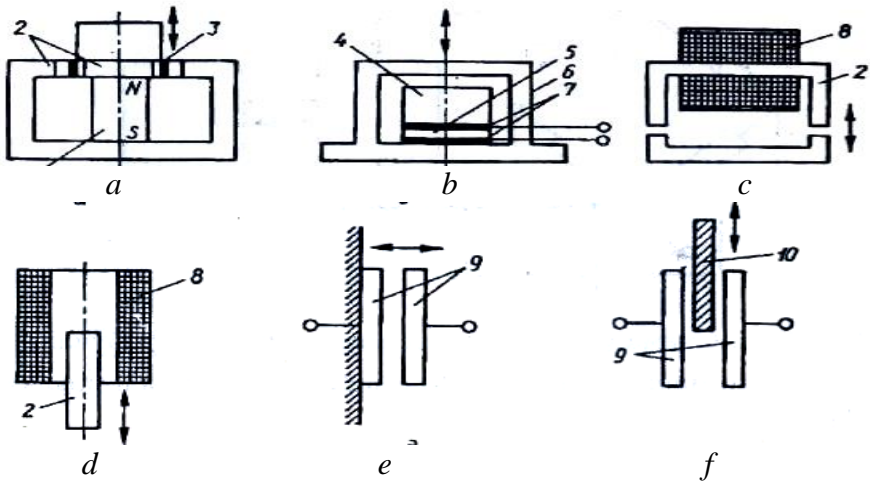


Рис.2.25. Вібродавачі:

а – Індуктивний; б – п'єзоперетворювач; с, д – індуктивні; е, ф – ємнісні;  
 1 – магніт; 2 – магнітопровід; 3 – котушка; 4 – сейсмомаса; 5 – п'єзоелемент;  
 6 – корпус; 7 – обкладки; 8 – обмотка; 9 – пластини конденсатора; 10 – діелектрик.

Широко використовують у випробуваннях будівельних конструкцій індукційні вібродавачі ВЗГИК, ВИБ-Л, К-001. Їх принцип роботи полягає в наступному: корпус приладу встановлюють на досліджуваній об'єкт і він коливається разом з ним, а маятник через інерцію залишається нерухомим і так створюється відносний рух

індукційної котушки, закріпленої на кінці маятника, та постійного магніту, прилаштованого на корпусі.

Вторинними приладами для динамічних випробувань є осцилографи, швидкодієні самозаписувальні прилади, магнітографи, епюрографи, ПК. Якщо віброперетворювачі мають на виході сигнал достатньої величини не чутливі до коливань температури, то їх підключають до вторинного приладу безпосередньо. Якщо потужність вихідного сигналу недостатня, то застосовують підсилювачі (рис.2.26).

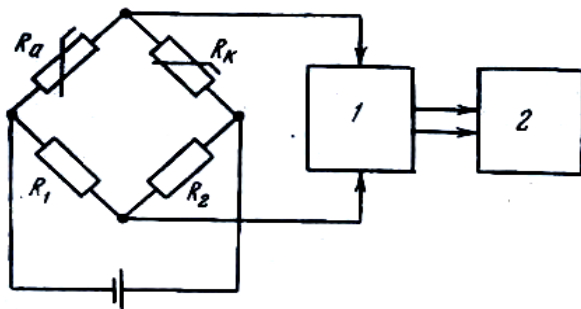


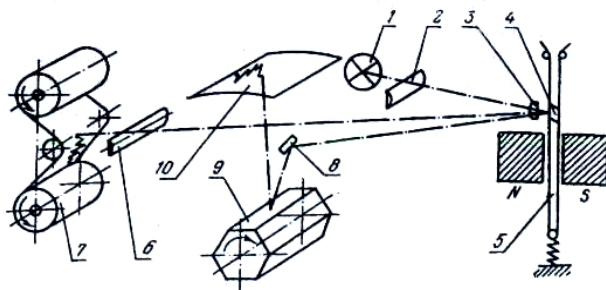
Рис.2.26. Схема установки для динамічних випробувань:  
 $R_a$  і  $R_k$  активний і компенсаційний тензорезистори; 1 – підсилювач,  
2 – осцилограф.

Світлопроменеві осцилографи (рис.2.27) дають можливість візуально спостерігати і синхронно записувати на фотострічці осцилограми, одну або декілька функцій часу. Це забезпечує набір гальванометрів з різними власними частотами і широким діапазоном швидкостей руху фотострічки. Струм від первинного приладу проходить через петлю чи рамку гальванометра і, взаємодіючи з магнітним полем, викликає поворот дзеркала пропорційно струму. Світловий промінь пронизує систему лінз і відбивається від дзеркала гальванометра на фотострічку, що рухається. Дзеркальний барабан, який обертається навколо осі, розгортає зображення на екрані для візуального спостереження, що дозволяє вибирати швидкість і масштаби таким чином, щоб окремі осцилограми від кількох гальванометрів не накладалися одна на одну.

В струменевих осцилографах замість світлового променя використовують тонкий струмінь чорнила, направлений від гальванометра на паперову стрічку, яка рухається. Це дозволяє отримати осцилограму на паперовій стрічці без її додаткової обробки (проявлення).

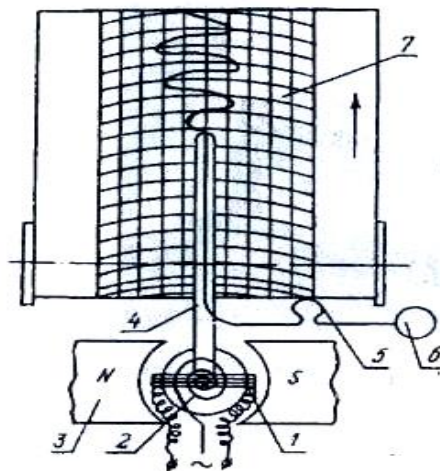
Електронно-променеві осцилографи дозволяють реєструвати високочастотні процеси завдяки безінерційності. Їх можна обладнати запам'ятовувальними електронно-променевими трубками, які

зберігають протягом певного часу записане зображення і забезпечують його повторне відновлення.



*Рис.2.27.* Принципова схема світло променевого осцилографа:  
 1 – лампа; 2 – конденсатор; 3,6 – лінзи; 4 – дзеркало гальванометра;  
 5 – гальванометр; 7 – фотострічка; 8 – дзеркало; 9 – барабан; 10 – екран.

Швидкодійними самозаписувальними приладами (*рис.2.28*) записують невелику кількість (до 9) низькочастотних процесів безпосередньо на папір.



*Рис.2.28.* Схема швидкодійного самозаписувального приладу:  
 1 – рухома рамка; 2 – спіральна пружина; 3 – магніт; 4 – важіль для запису;  
 5 – трубка для чорнила; 6 – ємність для чорнила; 7 – папір.

Їх принцип роботи базується на повороті в магнітному полі рамки з тонкого дроту, до якого прикріплено важіль з трубкою для подачі чорнила. Під дією електричного струму, підведеного до виводів рамки, створюється кружний момент і важіль повертається на певний кут. На стрічці, що рухається, записуються коливання досліджуваної конструкції.

У магнітографах (рис.2.29) носієм отримуваної інформації є магнітна стрічка, що рухається з постійною швидкістю поблизу магнітних головок, які записують (5), стирають (4) і відтворюють (6) електричний аналог сигналу, що дає можливість детально проаналізувати записи з допомогою сучасного обладнання. Недоліками магнітограм є неможливість візуального сприйняття сигналів, менша чутливість і вплив зовнішніх електромагнітних полів.

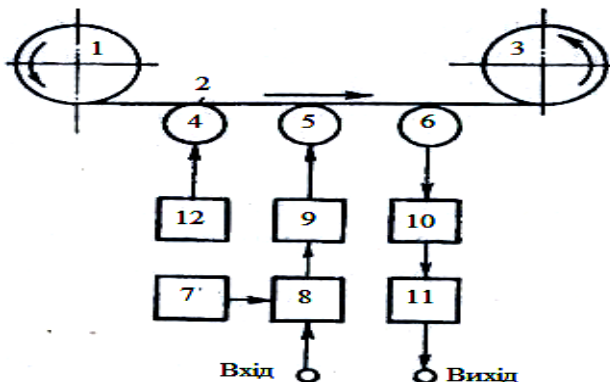


Рис.2.29. Блок-схема магнітографа:

1 – котушка для подачі, 2 – магнітна стрічка, 3 – котушка для прийому, 4-6 – магнітні головки стирання, запису та відтворення, 7 – генератор несучої частоти, 8 – модулятор, 9-10 – підсилювачі запису і відтворення, 11 – демодулятор, 12 – генератор стирання.

Великі можливості для визначення параметрів коливань будівельних конструкцій мають прилади, оснащені ПК. Вони дозволяють не тільки фіксувати процеси коливань, але й обробляти і аналізувати отримані дані. Так, прилад VIBROPORT 30 виробництва фірми SCHENC (ФРН) заміряє амплітудні та фазові характеристики, частоти коливань, проводить частотний і гармонійний аналізи тощо (рис. 2.30).

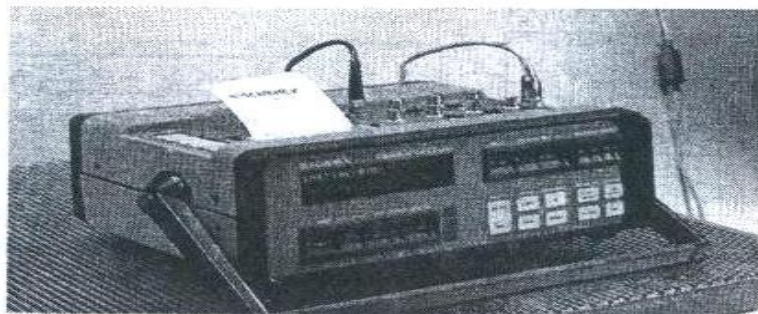


Рис. 2.30. Прилад з мікропроцесором VIBROPORT 30.

## 2.6. Висновки до розділу 2

На основі ґрунтового аналізу науково дослідних джерел та виконаних авторами експериментальних досліджень обстежень та випробувань і аналізу одержаних результатів коротко можна підсумувати в таких висновках:

1. Розглянуто способи випробувань конструкцій за статичним і динамічним видами навантажень та за величиною навантаження експлуатаційного та руйнівного. Залежно від мети дослідження проводять такі випробування: науково-дослідні, контрольні, сертифікаційні, приймальні та експлуатаційні. Сформульовано та описано силові дії та способи створення статичних навантажень.

2. Описано вимірювальні прилади для статичних випробувань. Наведено схеми елементів механічного та електромеханічного тензометра. Розглянуто будову тензометра з дроту і фольги та конструкцію п'єзоелектричного перетворювача і принципові схеми вимірювання деформацій, схему вимірювань струнного тензометра та схему зсувоміра і принцип вимірювання прогиномірами, схеми роботи клінометрів.

3. Представлено динамічні навантаження де розглянуто їх види, зокрема, нерухоме вібраційне і змінне за величиною, ударне в певній визначеній точці та рухоме вібродинамічне. Описано також основні вимірювальні прилади контактні і дистанційні. Зокрема, наведено схеми механічних приладів та схеми вібрографів, – схема установки для динамічних випробувань світлопроменевого осцилографа, блок-схему магнітографії та ін.

4. На підставі багаторічних випробувань представлено основні схеми випробувань і розташування приладів. Зокрема, необхідно враховувати такі три засоби: 1 – кількість завантажувальних елементів має бути мінімальна; 2 – всі основні несучі елементи потрібно схопити; 3 – для дослідів слід вибирати елементи з найбільш чіткою схемою статичного спирання і закріплення. Представлено також низку схем випробування різних конструкцій, – це плити, колони, ферми, арки, нерозрізного ригеля і ін. з конкретною розстановкою приладів для вимірювання деформації.



### **3. НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ ВИПРОБУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ**

#### **3.1. Фізико-механічні характеристики матеріалів та неруйнівні методи випробувань конструкцій**

##### **3.1.1. Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів**

Успішно підвищити якість будівельних матеріалів, виробів і конструкцій, а отже, надійність і довговічність будівель і споруд можна за умови удосконалення виробництва та методів контролю якості на всіх етапах будівельного виробництва. Головними критеріями високої якості будівельних об'єктів є фізичні, геометричні і функціональні показники. До них належать фізико-механічні властивості і структура матеріалів, геометричні розміри конструкцій і їх елементів, точність їх збирання (складання) і монтажу будівельних конструкцій [97, 127, 128].

Контролювати якість будівельних матеріалів, виробів і конструкцій загалом можна двома основними способами. Перший пов'язаний з виявленням граничної несучої здатності досліджуваних об'єктів шляхом доведення їх до руйнування. Такий спосіб достатньо ефективний під час проведення стандартних випробувань зразків із сталі, бетону й інших конструктивних матеріалів, при випробуванні моделей споруд і їх фрагментів конструкції можуть доводитися до граничного стану. Що ж стосується реальних об'єктів, то їх руйнування з метою виявлення граничної несучої здатності економічно недоцільне, а іноді й неможливе [23, 127, 128].

Найбільш повну інформацію про характеристики міцності матеріалів конструкцій дають лабораторні випробування зразків, взятих із тіла конструкцій. Проби із металевих конструкцій відбирають шляхом вогневого різання, причому об'єм вирізаного із конструкції матеріалу повинен перевищувати об'єм виготовленого із нього зразка для виключення зони зі зміненою структурою металу під час температурного нагріву. Товщину цієї зони приймають 10 мм. Місце вирізання зразка повинно бути посилене шляхом наварювання вставок і накладок, при цьому слід передбачити способи зменшення залишкових напружень від зварювання.

Зразки слід відбирати у найменш напружених елементах конструкцій, якими є верхні пояси балок біля крайніх шарнірних опор, нульові стержні ферм і ін. Наведена рекомендація дещо зменшує ефективність описаного прийому, так як у багатоелементних мета-

левих конструкціях за характеристиками одного елемента не завжди можна судити про параметри інших. Крім цього, кількість зразків, взятих із досліджуваного об'єкта, не може бути великою, що знижує об'ємність (достатність) отриманої інформації. Але при цьому слід враховувати, що спосіб відбору проб дозволяє виявити характеристики міцності матеріалу безпосередньо.

Під час взяття проб із залізобетонних конструкцій використовують алмазні коронки і диски із синтетичних алмазів. Розміри кубів для випробувань на стиск повинні бути не менше 70,07 мм, балочки для випробування на згин повинні мати переріз 100x100 мм при довжині 400 мм. Цим умовам відповідають зразки, одержані із масових конструкцій. Якщо створити зразки вказаних розмірів неможливо, випробовують зразки іншого об'єму, при цьому враховують масштабний фактор. Після виймання зразків із тіла конструкції необхідно одразу ж заробити пустоти, які утворилися, бетоном, приготовленими із цементів безосадових.

Зразки треба випробовувати одразу після виймання із конструкції. У протилежному випадку необхідно вжити відповідних заходів для консервації зразків. Раціональним є установа в тіло об'єкта бездонних форм, які закладають у конструкцію при її бетонуванні і виймають після випробувань.

Використання неруйнівних методів випробувань конструкцій і їх елементів дозволяє зберегти експлуатаційну придатність розглядуваного об'єкта без порушення несучої здатності і виявити його дійсний стан. Неруйнівними методами можна визначити вологість заповнювачів бетону, ступінь ущільнення бетонної суміші у процесі формування, щільність (густину) і міцність бетонів у виробках, а також виконувати дефектоскопію конструкцій.

Неруйнівні методи побудовані здебільшого на непрямому (опосередньому) визначенні властивостей і характеристик об'єкта випробувань, їх класифікують за видами випробувань [62, 97, 127, 128]:

- метод проникнення середовищ, який базується на реєстрації індикаторних рідин або газів, які проникають в об'єкт;
- механічні методи випробувань – аналіз місцевих руйнувань, переміщень під час введення навантажувального органу у тіло матеріалу, вивченням поведінки об'єктів у резонансному стані;
- акустичні методи випробувань пов'язані з визначенням параметрів пружних коливань з допомогою ультразвукового навантаження і реєстрацією ефектів акустоемісії;
- оптичні методи випробувань моделей і конструкцій в на-

прямленому та у відображеному випромінюваннях;

- магнітні методи (індукційний і магнітопорошковий);
- радіаційні випробування пов'язані з використанням нейтронів, радіоізотопів і гальмівного випромінювання;
- теплові методи базуються на вивченні теплових полів і теплового контрасту об'єктів;
- радіохвильові методи побудовані на ефекті розповсюдження високочастотних і надвисокочастотних коливань у досліджуваних об'єктах;
- електричні методи, які ґрунтуються на оцінці електроємності, електроіндуктивності і електроопору об'єкта.

Оцінюючи можливості руйнівних і неруйнівних методів випробування споруд, слід врахувати, що перші можна використати тільки при проведенні модельних випробувань і вивченні дослідних зразків нових конструкцій, а також вибірковому контролю виробів на заводах. Неруйнівні методи випробування не порушують експлуатаційних властивостей досліджуваних систем. Вони дозволяють виявити дійсний стан конструкцій, встановити відповідність реальних властивостей проектним, прогнозувати експлуатаційний ресурс.

### **3.1.2. Неруйнівні методи випробувань конструкцій**

Суттєво підвищити якість будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, а відповідно, надійність та довговічність будівель та споруд можна за умови покращення виробництва та методів контролю якості на всіх етапах виготовлення.

Контролювати якість будівельних матеріалів, виробів та конструкцій можна двома способами. Перший з них зв'язаний з виявленням межі несучих здатностей об'єкта, після якої досліджувані конструкції остаточно руйнуються. Цей спосіб ефективний і необхідний під час стандартних випробувань зразків, дослідженні моделей конструкцій та їх фрагментів. Що стосується реальних об'єктів, то руйнування їх з метою виявлення межі несучих властивостей економічно невиправдане.

Велику увагу приділяють неруйнівним методам випробувань конструкцій та їх елементів. Розвиток фізики та радіоелектроніки дозволив розробити та впровадити в дослідницьку практику ряд неруйнівних методів контролю якості матеріалів, виробів та конструкцій. Вони мають певні переваги, а саме [127, 128]:

1) збереження цілісності контролюючої конструкції або виробу, тобто під час випробувань не пошкоджують конструкцію чи ви-

ріб, а отже, не знижують їх несучу здатність;

2) можливість багаторазового випробування зразка або конструкції в часі як в процесі виготовлення, так і в період експлуатації. Це дає можливість отримати точніші значення характеристик, а також встановити закономірність зміни шуканого показника в часі;

3) порівняно мала трата часу на проведення досліджень;

4) можливість визначення необхідної характеристики в будь-якій доступній точці.

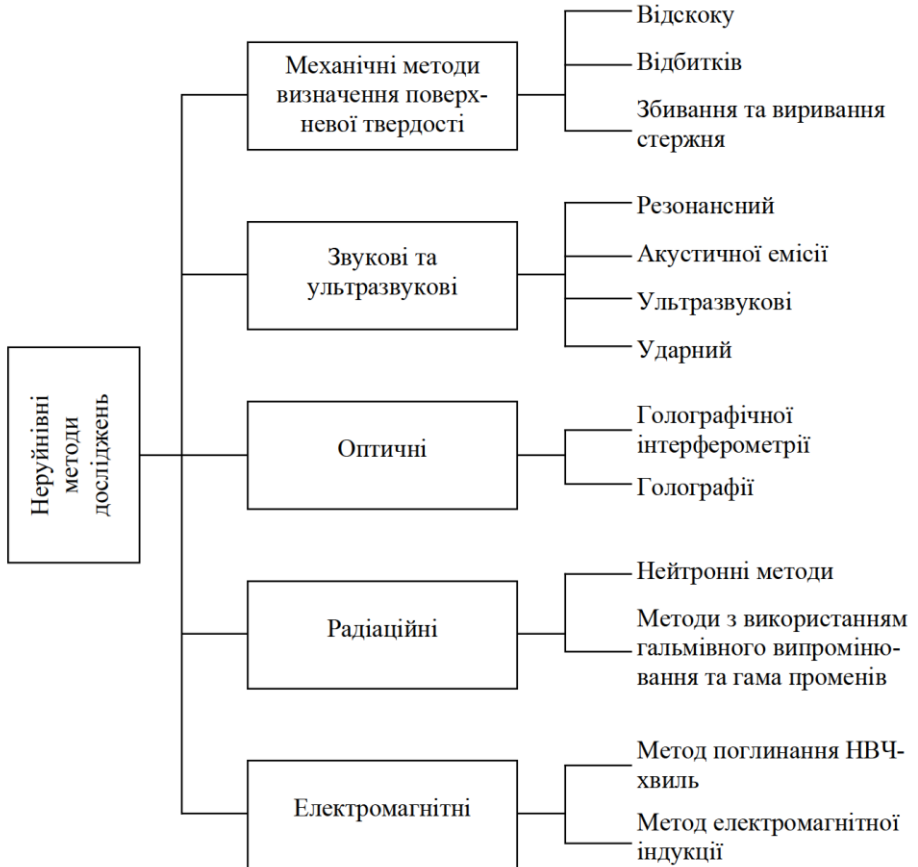


Рис. 3.1. Схема класифікації неруйнівних методів

Поряд з вказаними перевагами неруйнівний метод має недолік – результати випробувань отримують не безпосередньо у вигляді шуканого фактора, яким може бути межа міцності, густина, модуль пружності матеріалу, а у вигляді побічних показників, якими є швидкість проходження ультразвуку, діаметр відбитка та ін. Ця обставина потребує додаткового встановлення взаємозв'язку між по-

казником, отриманим експериментально, та шуканою характеристикою (наприклад, швидкість проходження ультразвуку – границя міцності бетону).

Для класифікації неруйнівних методів необхідно врахувати ту фізичну основу, на базі якої розроблений метод випробування.

Орієнтовна схема класифікації методів [62, 127, 128] випробувань на фізичній основі показана на *рис. 3.1*. Як бачимо, вони ґрунтуються на принципах, викладених в різних розділах фізики.

Можливе використання комбінованих методів, де для визначення шуканої характеристики поєднують два або більше вищезгаданих методів. Варіант комбінованих методів подано на *рис. 3.2*.



*Рис. 3.2.* Схема комбінованих методів

### 3.2. Механічні методи визначення поверхневої твердості

Механічні (склерометричні) методи побудовані на визначенні поверхневої міцності матеріалу шляхом нанесення фіксованої силової дії [23, 41, 43, 97, 127, 128, 178]. Їх можна використовувати для встановлення міцності всіх видів матеріалів: металу, бетону, пластмас, деревини. До механічних методів визначення поверхневої тве-

рдості належать такі, які встановлюють міцність матеріалу на стискання завдяки існуючій залежності між міцністю на стискання та поверхневою твердістю. Механічний контроль твердості базується навикористанні емпіричної залежності між деякою фізико-механічною характеристикою (діаметр відбитка, висота відскоку ударника за фіксованої силової дії) та твердістю. В цих методах застосовують порівняно прості механічні пристрої. Механічні методи визначення поверхневої твердості бетону можуть забезпечити інформацією лише про відносно тонкий шар поблизу поверхні.

Вони діляться на три групи: 1) основані на відскоку; 2) основані на відбитку; 3) основані на відриві, сколюванні та забиванні.

Перші дві групи – суто неруйнівні методи випробувань; це безпосередньо методи визначення поверхневої твердості. До останньої належать такі, що частково руйнують конструкцію.

### **3.2.1. Метод визначення твердості, оснований на відскоку**

Принцип методу. Рухома маса падає на поверхню бетону з деякою початковою енергією. В результаті удару початкова кінетична енергія перерозподіляється: одна частина поглинається бетоном у вигляді енергії пластичної деформації або остаточної, а інша передається рухомій масі пропорційно залишковій частині вільної енергії. Щоб початкова енергія розподілялась лише між двома вказаними видами енергії, практична маса бетону повинна бути нескінченною проти рухомої. Вся початкова енергія або її частина залежать від відносної маси двох тіл, яка в результаті удару перетворюється в кінетичну енергію відскоку. Вимогам нескінченної маси бетону відповідають значні елементи конструкцій, а для удару використовують невеликі за масою ударники.

Енергію, необхідну для удару, отримують за допомогою пружин.

Значення відскоку  $h$  визначається його енергією, отриманою в результаті удару до поверхні бетону і задається системою пружин (на *рис. 3.3* не показані). Пружини повинні бути еталонованими, механізм має забезпечити їх регулювання по довжині. Вимірюють відскок за допомогою індикатора зі стрілкою та шкалою, на якій нанесені поділки. Схема склерометра подана на *рис. 3.3*.

Між міцністю бетону та величиною відскоку існує визначена залежність, яка зображається кривою лінією, що називається тарувальною. Для побудови такої кривої необхідно провести паралельні випробування. На одному зразку визначається величина пружного відскоку та границя міцності на стиснення. За цими хара-

ктеристиками отримують сімейство точок, і проведена по них середня лінія є тарувальною кривою.

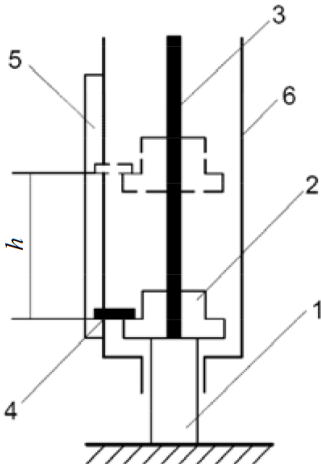


Рис. 3.3. Схема склерометра:  
1 – ударник; 2 – рухома маса; 3 – стержень; 4 – стрілка; 5 – шкала; 6 – корпус

Серед існуючих пристосувань для визначення поверхневої твердості найбільш широко використовують склерометр Шмідта, склерометр КМ, молотки Осадчука, Боровського, Цариціна та ін.

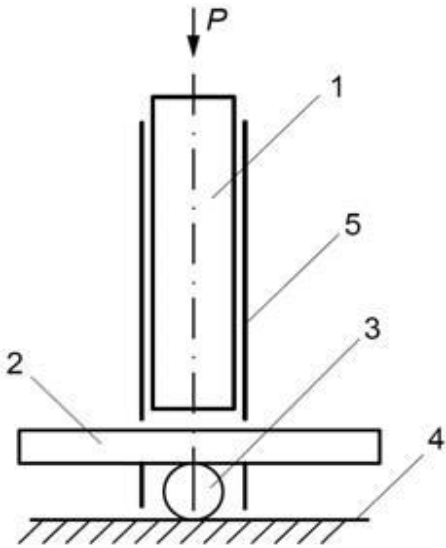
### 3.2.2. Метод визначення твердості, оснований на відбитку

Цей метод (метод пластичних деформацій) побудований на принципі залежності діаметра або глибини відбитка, утвореного втисненням штампа (кульки) в тіло, від міцності матеріалу [23, 97, 128, 178]. Розрізняють два його різновиди: 1) метод з використанням одного відбитка, який утворюється на поверхні і характеризується геометричними розмірами; 2) метод з двома відбитками, з яких один отриманий у результаті активної дії на досліджуваний матеріал, а другий – як пасивний на еталонному матеріалі.

Залежно від конструктивного оформлення прилади цього методу поділяють на статичні (навантаження на штамп передається рівномірно зі зростанням зусиль) та динамічні (навантаження передається у вигляді удару).

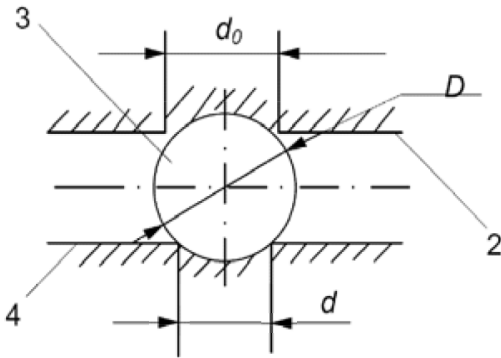
Метод з використанням одного відбитка – це відомий метод визначення твердості за Брінеллем Н. В. під час статичного втиснення сталльної кульки в тіло матеріалу. Існують методи визначення твердості за Роквеллом та Віккерсом. До приладів, що працюють у цьому методі слід віднести склерометр Франка, склерометр ХПС, штамп НІЖБ, склерометр Новгородського та ін. Суттєвою їх ознакою є необхідність визначення величини прикладеного навантаження.

Для встановлення твердості матеріалу в практиці широко застосовують метод з двома відбитками [98]. Схематично принцип роботи приладів, побудованих на цьому методі, показано на *рис. 3.4*, а геометричні параметри на *рис. 3.5*.



*Рис. 3.4.* Схема склерометра (прилад Польші):

- 1 – стержень; 2 – еталонний брусок;
- 3 – сталюа кулька; 4 – досліджуванa поверхня; 5 – корпус



*Рис.3.5.* Геометричні параметри для визначення твердості: 1 – стержень; 2 – еталонний брусок; 3 – сталюа кулька; 4 – досліджуванa поверхня; 5 – корпус

Під час удару по стержню на досліджуваній поверхні та еталонному бруску, твердість якого відома, залишаються відбитки.

Діаметр  $D$  сталюї кульки 3 відомий, визначають діаметри відбитків на поверхні  $4d$  та на еталонному бруску  $2d_0$  (*рис. 3.5*):

$$HB = HB_0 \frac{D - \sqrt{D^2 - d_0^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}, \quad (3.1)$$

де  $HB_0$  – твердість еталонного бруска.

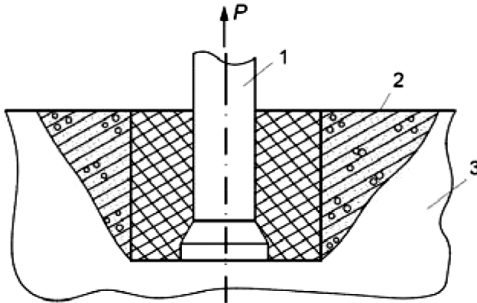
З приладів, робота яких побудована на такому методі, слід відзначити, еталонний молоток Кашкарова, прилад Польші-Вайцмана.



### 3.2.3. Інші механічні методи визначення поверхневої твердості

До механічних неруйнівних методів випробувань відносяться метод місцевого руйнування, метод пластичної деформації та метод пружного відскоку [23, 85, 97, 128]. Перший, хоча і належить до неруйнівних, все ж таки пов'язаний з певним послабленням несучої здатності конструкцій.

Міцність бетону можна встановити шляхом випробувань на відрив зі сколюванням, які пов'язані з вийманням із тіла бетону або попередньо встановлених анкерів, або відриву із масива деяких його частин. На *рис. 3.6* побудована принципова схема таких випробувань. З допомогою домкратів із тіла бетону 3 виймається анкер 1 і фіксується величина сили, яка відповідає моменту витягування об'єму бетону 2.



*Рис. 3.6.* Анкерне пристосування для визначення міцності бетону методом висмикування: 1 – анкер; 2 – об'єм бетону, який витягується; 3 – тіло бетону

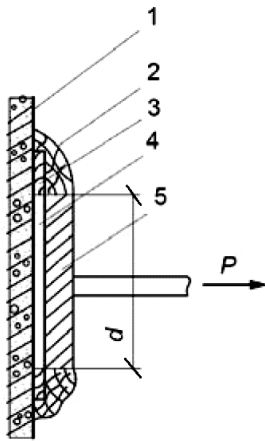
Границю міцності бетону  $R$  обчислюють за формулою:

$$R = k \cdot m \cdot P, \quad (3.2)$$

де:  $k$  – коефіцієнт, зафіксований у відповідних документах;  $m$  – коефіцієнт, який приймають рівним одиниці при товщині заповнювача до 50 мм і 1,1 – за більшої товщини;  $P$  – сила, яка відповідає відриву і визначається за манометрами.

Досягненням цієї схеми є те, що нема потреби будувати тарувальну криву. Менш трудомістким є спосіб, який базується на визначенні міцності бетону відривом. На поверхні бетону 1 (*рис. 3.7*) епоксидним клеєм 4 кріпиться стальний диск 5. Для виключення витікання епоксидної смоли за межі сталюого диска між поверхнею конструкції і диском вкладається паперове кільце 3. Для забезпечення кріплення диска з конструкцією у процесі тверднення епоксидної смоли контур диска обмазується гіпсовим розчином 2, який ліквідується під час випробування. Швидкість навантаження диска не повинна перевищувати 1 кН/с. Клас бетону визначають за граду- йованою залежністю умовного напруження  $R = 4P (\pi d^2)$  при відриві від границі міцності  $R$ , стиску бетонних кубів з розмірами сторін

150 мм;  $d$  – діаметр диска;  $P$  – сила відриву. Дві протилежні грані кожного зразка випробовують на відрив.

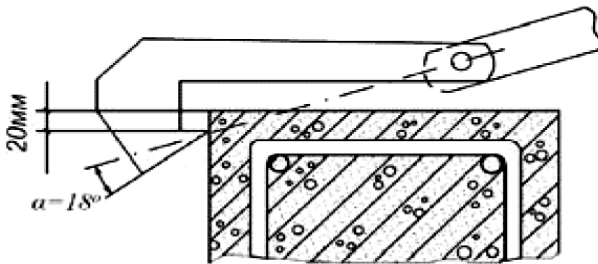


*Рис. 3.7.* Пристрій для визначення міцності бетону методом відриву:

1 – поверхня бетону; 2 – гіпсовий розчин; 3 – паперове кільце; 4 – епоксидний клей; 5 – сталевий диск

Можна встановити міцність бетону на основі визначення сили  $P$  сколювання ділянки ребра конструкції. На *рис. 3.8.* наведена схема відповідної установки. При ширині майданчика сколювання 30 мм ребро конструкції пошкоджується на ділянці 60...100 мм.

Для одержання результатів випробування виконують як мінімум на двох сусідніх ділянках і беруть середнє значення.



*Рис. 3.8.* Пристрій для сколювання ребра конструкції

Для побудови градуїрованої залежності сили сколювання і міцності бетону на стиск  $R$  досліджують стандартні бетонні куби зі сторонами 150 мм. Приклад тарувальної (градуїрованої) кривої подано на *рис. 3.9.*

Метод пластичних деформацій для бетону базується на оцінці місцевих деформацій, викликаних прикладанням до конструкції зосереджених сил. В основу цього методу покладено залежності розмірів відбитка на поверхні елемента, внаслідок втиснення індентора статичною або динамічною дією, від характеристик міцності матеріалу.

Серед інших методів визначення поверхневої твердості матеріалів слід виділити метод забивання стержня. Випробовують,

вводячи в бетон, металеві елементи (стержні) за допомогою пост-рілу і вимірюють силу під час виривання стержня з бетону.

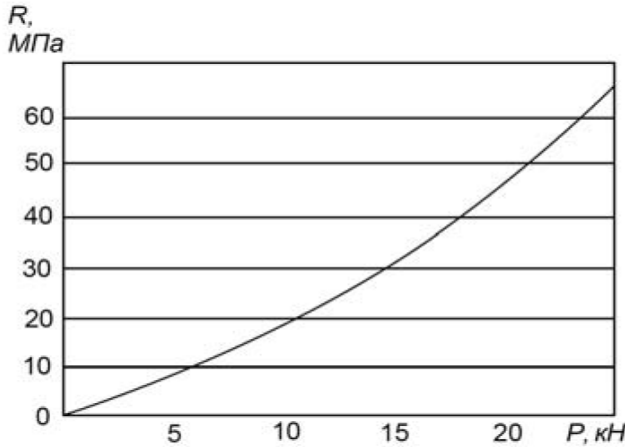


Рис. 3.9. Тарувальна крива для визначення міцності бетону за зусиллям сколювання ребра конструкції

Для забивання металевих штифтів, стержнів у бетон використовується монтажний пістолет. Як снаряд застосовують сталевий стержень з загостреним та загартованим кінцем. Вистрілюють строго перпендикулярно до поверхні матеріалу.

Глибина проникнення сталевий стержня залежить від міцності бетону. За значеннями глибини проникнення будують тарувальну криву, яка дозволяє перейти від глибини проникнення до міцності бетону при стисненні. При використанні методу слід забезпечити постійність заряду, однаковий тиск на стержень.

Метод виривання полягає ось у чому. За допомогою домкратів з бетону виривається попередньо вставлений анкерний стержень і за допомогою динамометра фіксується величина сили в момент виривання. Враховуючи поправкові коефіцієнти, шкалу динамометра можна проградувати у відповідних одиницях міцності. При використанні цього методу нема необхідності будувати тарувальні криві.

У механічних методах визначення поверхневої твердості бетону не можна розраховувати на отримання інформації про шар на глибині більше 3 см. Під час досліджень бетону пізнього віку завдяки підвищеній карбонізації поверхневого шару і збільшенню його твердості можлива переоцінка фактичної міцності.

Не рекомендовано застосовувати механічні методи визначення поверхневої твердості для бетонів низьких марок. Такі бетони готують, витрачаючи невелику кількість цементу, тому це-

ментний розчин займає невеликий відсоток загальної площі бетону, і є значний ризик, що в досліджуваних точках замість пластичних деформацій бетон зруйнується, або, навпаки, буде враховано вплив великофракційного наповнювача.

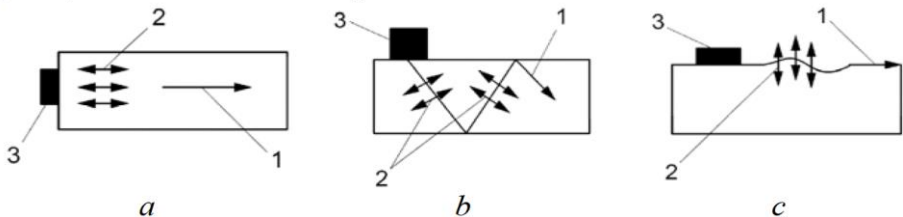
### 3.3. Акустичні методи дослідження конструкцій

Акустичні методи побудовані на дослідженні характеру розповсюдження звуку в конструкційних матеріалах. Звук – коливальний рух частинок пружного середовища, що розповсюджується у вигляді хвилі в газоподібному, рідкому та твердому середовищах. Пружні хвилі прийнято розділяти на інфразвукові, частотою до 20 Гц, звукові, частота яких лежить в межах від 20 Гц до 20 кГц, ультразвукові, частотою від 20 кГц до 1000 МГц, та гіпер-звукові, частота яких перевищує 1000 МГц. Під час досліджень бетонів і керамік використовують ультразвукові коливання, частотою від 20 до 200 кГц, а металу та пластмаси – частотою від 30 кГц до 10 МГц.

Акустичні методи будуються на відомих залежностях, що визначають характер розповсюдження хвиль у суцільних середовищах [11, 41, 62, 63, 127, 128]. Картина розповсюдження хвиль досить складна, тому що під час дії на середовище швидкоплинних процесів збуджуються хвилі різного типу.

Колівання викликають за допомогою генераторів, що працюють як п'єзометричні або електромагнітні перетворювачі, за допомогою ударів по конструкції, а також змінюючи структуру самої конструкції внаслідок прикладених навантажень.

Ультразвукові коливання в твердих тілах поділяються на поздовжні, поперечні та поверхневі, їх утворення залежить від місця розташування збуджувача відносно геометричних форм конструкції, як це показано на *рис. 3.10*.



*Рис. 3.10.* Утворення ультразвукових коливань:

*a* – поздовжні; *b* – поперечні; *c* – поверхневі; 1 – хвилі; 2 – напрям вібрації; 3 – збуджувач (генератор)

Збуджувачі п'єзоелектричних або магнітострикційних коливань створюють хвилю поздовжнього типу. Для отримання по-

перечних хвиль використовують явище трансформації поздовжньої хвилі на межі розподілу двох середовищ.

На межі розподілу двох середовищ (рис. 3.11) під кутом  $\alpha$  падає поздовжня хвиля. На межі вона трансформується в проникальні та відбиті поздовжні та поперечні хвилі. Кут заломлення  $\beta_{long}$  поздовжньої хвилі більший за кут заломлення  $\beta_{lat}$  поперечної. Збільшуючи кут  $\alpha$ , можна досягнути такого положення, коли проникальна поздовжня хвиля розповсюджуватиметься лише по поверхні, а в іншому середовищі існуватиме лише поперечна.

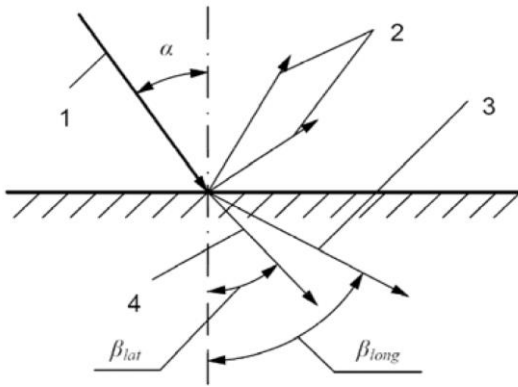


Рис. 3.11. Схема проходження хвиль через межі середовищ: 1, 3 – поздовжні хвилі; 2 – відбиті; 4 – поперечна хвиля

Подальше збільшення кута дозволить досягти такого стану, коли поперечна хвиля другого середовища буде проходити на межі розподілу.

Існує залежність між параметрами коливань, густиною та пружністю середовища:

$$\lambda = \frac{v}{f}; \quad v = \frac{E_d}{\rho}; \quad \mu = \frac{2 - \left(\frac{v_{long}}{v_{lat}}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{v_{long}}{v_{lat}}\right)^2}, \quad (3.3)$$

де:  $\lambda$  – довжина хвилі;  $v$  – швидкість;  $f$  – частота;  $E_d$  – динамічний модуль пружності;  $\rho$  – акустична густина;  $\rho = \gamma g$  (тут  $\gamma$  – густина матеріалу;  $g$  – прискорення сили тяжіння);  $v_{long}$ ,  $v_{lat}$  – швидкості поздовжніх та поперечних хвиль.

Акустичними методами контролюють суцільність (виявляють тріщини, раковини, включення та ін.), товщину, структуру, фізико-механічні властивості (міцність, густина, модуль пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона), вивчають кінетику руйнування.

За неруйнівного контролю акустичними методами реєструють частоту, амплітуду, час, механічний імпеданс (загасання), спек-

тральний склад коливань. Режим коливань може бути безперервним або імпульсним.

До акустичних методів входять резонансний, тіньовий, імпульсний, акустичної емісії, велосиметричний, імпедансний, вільних коливань (ударний).

**Резонансний метод.** Він полягає в збудженні у зразках коливань змінної частоти і побудові резонансної кривої, за якою визначають динамічний модуль пружності, модуль зсуву, логарифмічний декремент коливань та міцність бетону. Залежно від мети дослідження використовують поздовжні, крутильні та прогинні коливання. Отримання одного з видів залежить від місця розташування випромінювача (генератора) та приймача на досліджуваному зразку. Враховується й умова розташування опор. Частота власних коливань стенда з опорами має бути набагато більшою (в 12–15 разів), ніж частота власних коливань зразка.

При використанні коливань різних видів зразок встановлюють на опори та під'єднують випромінювач і приймач (рис. 3.12).

До виходу приймача під'єднується реєструвальний пристрій – осцилограф. Електронний промінь на екрані осцилографа накреслить криву, яка відповідає коливанням зразка.

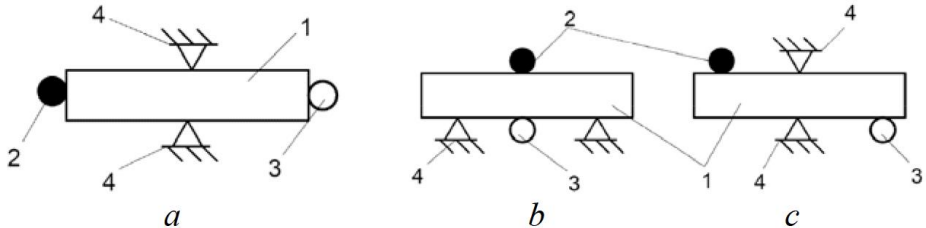


Рис.3.12. Схеми дослідження коливань:

*a* – поздовжні; *b* – прогинні; *c* – крутильні; 1 – зразок; 2 – випромінювач; 3 – приймач; 4 – опора

Зі зміною частоти вимушених коливань міняється амплітуда кривої на екрані і за деякого значення частоти амплітуда кривої буде найбільшою (рис. 3.13). Це відповідає моменту утворення резонансу, тобто збігаються частоти власних і вимушених коливань. Значення резонансної частоти визначають за шкалою генератора.

Логарифмічний декремент коливань знаходять за шириною резонансного піку кривої на рівні половини максимальної амплітуди за формулою:

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_1 - f_2}{f_0}, \quad (3.4)$$

де:  $f_0$  – резонансна частота коливань зразка;  $f_1$  та  $f_2$  – частоти коливань, що відповідають амплітудам, рівним половині макси-мальної до і після резонансу.

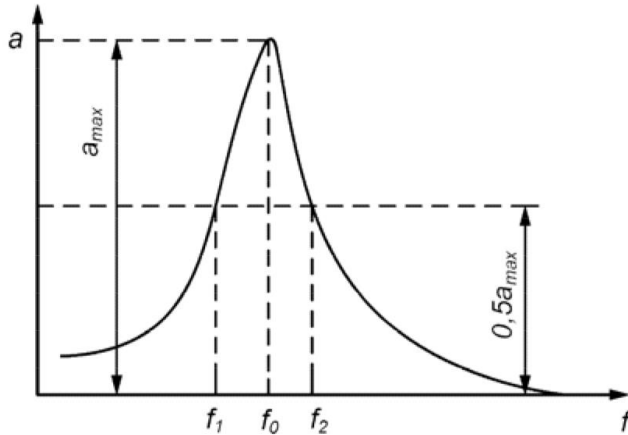


Рис. 3.13. Резонансна крива

Залежність між динамічним модулем пружності та частотою власних поздовжніх коливань виражається формулою

$$E_d = 4l^2 f_n^2 \rho, \quad (3.5)$$

де:  $l$  – довжина зразка;  $\rho$  – акустична густина бетону;  $\rho = \gamma g$ ,  $\gamma$  – об’ємна маса бетону;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $f_n$  – частота власних коливань зразка.

Резонансним методом визначають також коефіцієнт Пуассона для бетону:

$$\mu = K \left( \frac{f_n}{f_k} \right)^2, \quad (3.6)$$

де:  $K$  – коефіцієнт, що залежить від форми зразка;  $f_n$  та  $f_k$  – частоти власних коливань зразка під час поздовжніх та крутильних коливань.

У практиці досліджень матеріалів використовують прилади, що працюють на резонансному методі. Це вимірювач частоти коливань ІЧМК-2, вимірювач резонансної частоти ІРЧ-1, вимірювачі амплітудного загасання ІА3, УЗ-5, ППК-8 та ін. Серед зарубіжних – резонансний прилад ІSPH (Румунія), прилади SCT/5 та EDT/6 (Великобританія) та ін.

**Ультразвуковий метод.** Суть ультразвукового методу полягає в тому, що швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль у бетоні залежить від модуля пружності, який пов’язаний з міцністю.

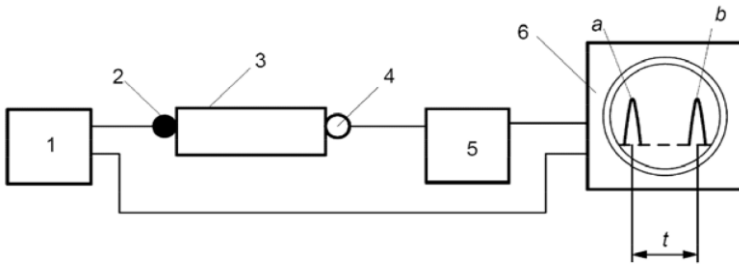
У бетонних масивах за найбільшого розміру перерізу зразка  $J$  двох довжин хвиль швидкість проходження ультразвукових поперечних хвиль визначається за формулою

$$v = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}. \quad (3.7)$$

На *рис. 3.14* подана спрощена схема ультразвукового приладу.

Високочастотний генератор періодично надсилає електричні імпульси на випромінювач, який перетворює їх в ультразвукові.

Далі імпульси, проходячи через дослідний зразок, вловлюються приймачем і підсилені за амплітудою підсилювачем направляються на вхід осцилографа. Одночасно такий самий імпульс безпосередньо від випромінювача потрапляє на вхід осцилографа. Він формує на екрані початкову мітку у вигляді кривої *a*. Така ж крива *b* утворюється на екрані після проходження імпульсу через дослідний зразок. Одночасно осцилограф виробляє так звані мітки часу, які спостерігаються на екрані. Підраховуючи кількість міток часу, розташованих між кривими *a* та *b*, і знаючи ціну однієї мітки, можна встановити проміжок часу *t*, за який ультразвукова хвиля пройшла бетон. Тепер неважко визначити швидкість поширення ультразвуку.



*Рис. 3.14.* Спрощена схема ультразвукового приладу:

- 1 – генератор; 2 – випромінювач; 3 – дослідний зразок; 4 – приймач;  
5 – підсилювач; 6 – осцилограф

З ультразвукових методів найбільш широко застосовується тіньовий та імпульсний (ехо). Тіньовим найчастіше виявляють дефекти в матеріалі, місце знаходження арматури в бетоні тощо.

Базується на фіксуванні акустичної тіні, що утворюється за дефектом внаслідок відбиття або розсіювання акустичного променя.

На *рис. 3.15* показано приклад використання тіньового методу. Сигнал від випромінювача та приймача передається на осцилограф. На екрані спостерігаються дві криві. За наявності на шляху променя дефекту амплітуда знижується або повністю зникає крива, що потрапляє на вхід осцилографа від приймача.

Так можна відтворити малюнок дефекту у горизонтальній площині. Однак відобразити глибину знаходження дефекту в тілі бетону нереально.



Траса прозвучування конструкцій ультразвуковими коливаннями може мати довільний напрям (рис. 3.16).

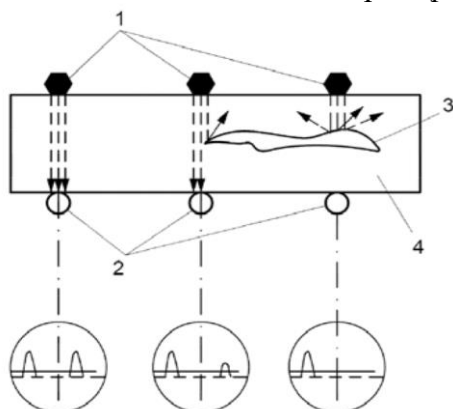


Рис. 3.15. Тіньовий метод дослідження з осцилограмами:  
1 – випромінювач;  
2 – приймач; 3 – дефект;  
4 – дослідний зразок

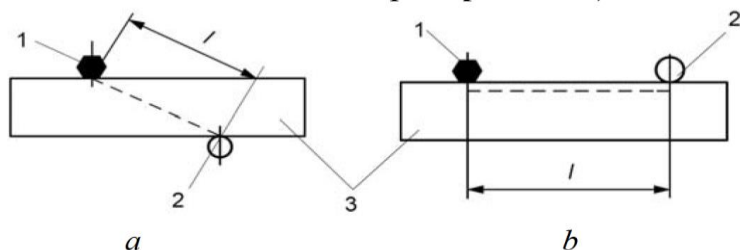


Рис. 3.16. Нахилене (а) та поверхневе (b) прозвучування:  
1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – дослідний зразок

За неможливості одночасного доступу до двох співвісних точок на різних поверхнях виробу використовують імпульсний ехо-метод. Тут випромінювач та приймач конструктивно виконані як єдиний прилад – перетворювач. Цей метод дозволяє не лише виявити місце розташування дефекту в тілі бетону, а й визначити віддаль до місця його знаходження, а також виміряти товщину виробу (рис. 3.17).

При визначенні глибини тріщини в бетоні випромінювач і приймач розташовують в точку *A* і *B* симетрично відносно видимої тріщини (рис. 3.18).

Коливання з точки *A* в точку *B* проходить найкоротшим шляхом *ACB* за час *t*:

$$ACB = \sqrt{4h^2 + a^2}. \quad (3.8)$$

На бездефектній ділянці поверхні бетону визначають швидкість розповсюдження в ньому ультразвуку. Для цього на певній віддалі *p* розташовують випромінювач та приймач і фіксують час *t* проходження хвилі:  $V = h t_2$ ,

$$h = \frac{V}{2} \cdot \sqrt{t - \left(\frac{a}{V}\right)^2}, \quad (3.9)$$

де:  $V$  – швидкість;  $t$  – час, визначений у досліді.

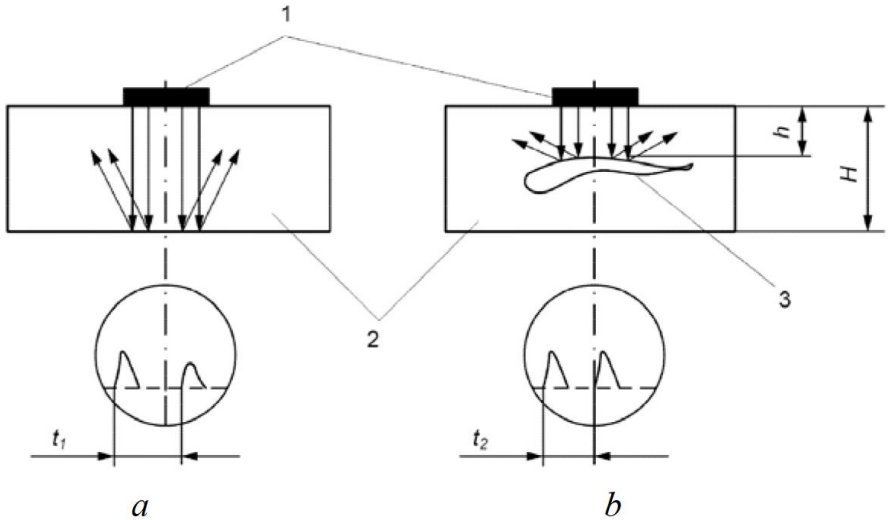


Рис. 3.17. Схема прозвучування виробу ехо-методом:  
1 – перетворювач; 2 – виріб; 3 – дефект

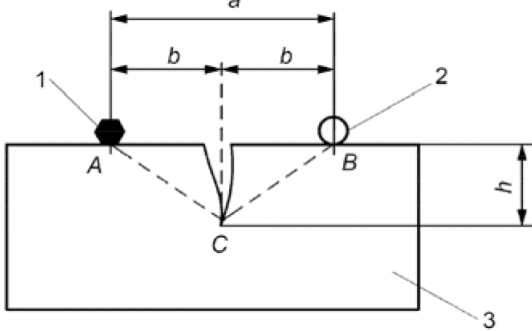


Рис. 3.18. Схема визначення глибини тріщини:  
1 – випромінювач; 2 – приймач; 3 – дослідний зразок

Під час дефектоскопії бетону ультразвуковим методом використовують наскрізне прозвучування та поздовжнє профілювання.

При наскрізному послідовно прозвучують ділянки конструкції і відзначають на координатній сітці точки, а потім – лінії рівних швидкостей – ізоспиди, або лінії рівного часу – ізохори, виділяючи ділянку конструкції, на якій знаходиться дефектний бетон (зона понижених швидкостей).

Метод поздовжнього профілювання дозволяє проводити дефектоскопію при розташуванні випромінювача і приймача на одній поверхні (дорожнє покриття, фундаментні плити, монолітні

плити перекриття тощо). Цим способом можна визначити глибину (від поверхні) руйнування бетону корозією.

Під час досліджень матеріалів ультразвуковими методами використовують вітчизняні ультразвукові прилади УП-4, УКБ-1, ДУК-20, УКБ-1М, ІСІ-66, "Бетон-3М" та ін., а також зарубіжні аналоги SBC-4, SBC-40 ( Франція).

При вивченні масивних конструкцій ультразвук неефективний через значне загасання хвиль під час проходження середовища. Однак при використанні коливань хвилі більшої довжини цей недолік можна усунути ударним методом.

**Ударний метод** визначення міцності бетону за своєю фізичною суттю не відрізняється від ультразвукового і побудований на тій самій залежності, яка існує між міцністю бетону та швидкістю розповсюдження в ньому звукової хвилі (рис. 3.19).

Звукові хвилі в бетоні збуджують ударом молотка. На поверхні елемента встановлюють два приймачі на певній відстанні  $a$ .

Звуковий імпульс, прийнятий приймачем А і підсилений підсилювачем, передається на лічильник часу і запускає його. Звукова хвиля, досягнувши приймача В, підсилена підсилювачем зупиняє лічильник часу. Так вимірюється час  $t$  проходження хвилі на базовій віддалі  $a$ . Швидкість розповсюдження хвиль у бетоні

$$V = a t . \quad (3.10)$$

Границю міцності бетону, залежно від швидкості розповсюдження ударної хвилі, визначають за допомогою тарувальної кривої або за спеціальними таблицями, що будують під час паралельних досліджень зразка. Для випробувань використовують прилади АМ-5, ПК-6, МК-1 та ін.

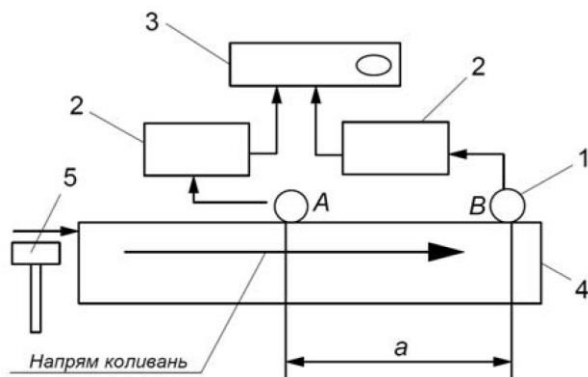


Рис. 3.19. Схема дослідження ударним методом:

1 – приймач; 2 – підсилювач; 3 – лічильник часу;

4 – дослідний зразок; 5 – молоток

**Метод акустичної емісії.** Основою методу є вловлювання та підсилення пружних хвиль, що випромінюються дефектами, а також дислокаціями під час перебудови структури в момент навантаження конструкції [11, 12, 87, 127, 128]. Під повільним навантаженням у твердому тілі поступово зростає механічна напруженість, кристалічна решітка твердого тіла накопичує пружну потенціальну енергію. Оскільки здебільшого навантажувані об'єкти неоднорідні за своїми фізико-механічними властивостями, в деякій ділянці твердого тіла локальне напруження досягає у визначений момент своєї межі і внутрішні зв'язки кристалічної решітки розриваються. В цей момент активно виділяється частина пружної енергії, накопичена раніше, значна доля якої використовується на швидке переміщення частинок у локальній зоні з порушеннями зв'язками. Пружна хвиля випромінюється, а напруження, сконцентровані в зоні неоднорідності, релаксують.

Головна особливість тіл з дефектами полягає в тому, що в дефектах концентруються напруження під навантаженням. Тому в таких зонах насамперед протікають пластична деформація, деформаційне зміцнення і, врешті, руйнування.

Про наявність дефекту судять за появою сигналів акустичної емісії, про рівень напруженого стану – за їх інтенсивністю (кількість сигналів за 1 с).

Експериментально встановлено, що окремі сигнали акустичної емісії являють собою імпульс високочастотних коливань у мегагерцевому діапазоні тривалістю декілька мікросекунд.

Два процеси – пластична деформація і ріст тріщин – розрізняються за амплітудним розподілом сигналів. Під час руйнування шляхом росту тріщин сигнали акустичної емісії мають більші амплітуди і рідші, ніж за пластичної деформації.

Характерною особливістю акустичної емісії під циклічним навантаженням є швидке зменшення кількості імпульсів та їх амплітуд після повторних (за першим) навантажень. Абсолютне зникнення акустичної емісії під час повторного навантаження свідчить про те, що матеріал не руйнується.

Апаратура для акустичної емісії складається з приймача коливань, системи фільтрів та підсилювачів, реєструвальних приладів, лічильника сигналів за одиницю часу, графобудувача, електронної апаратури для обробки та фіксації сигналів акустичної емісії. Встановлюється визначений мінімальний рівень сигналу (поріг), вище якого враховуються сигнали, їх реєструють записом, висвітленням

порахованих сигналів на екран дисплея, звуковим відтворенням у вигляді потріскування, інтенсивність якого зростає з розвитком дефектів, або на екран комп'ютера чи на вхід графобудувача.

Метод акустичної емісії дозволяє значно точніше визначити координати дефекту. Для цього встановлюють принаймні три приймачі. Координати визначаються на основі аналізу різниці часу надходження сигналу акустичної емісії на різні приймачі. Розроблені комп'ютерні програми такого аналізу дозволяють миттєво знайти місцезнаходження дефекту та графічно побудувати рисунок. Використовують його здебільшого для визначення моменту ініціювання руйнування, оскільки відомо, що старт тріщини і навіть передстартовий стан супроводжуються початком інтенсивної акустичної емісії.

Варто зазначити, що на сьогодні метод акустичної емісії є єдиним методом, за допомогою якого можна оцінювати небезпеку розвитку дефектів структури і здійснювати неперервний моніторинг стану об'єктів.

З інших акустичних неруйнівних методів для досліджень стану матеріалів та конструкцій слід виділити такі.

Велосиметричний – базується на фіксації швидкості коливань, впливу дефектів на швидкість розповсюдження хвиль та довжину шляху хвиль у матеріалі.

Імпедансний – оснований на аналізі зміни загасання хвиль у зоні дефекту.

### **3.4. Радіаційні методи**

Досягнення атомної фізики використовуються і в області неруйнівних методів досліджень. Вагомі практичні результати отримано за допомогою так званих "закритих" джерел випромінювання, під якими розуміють радіоізотоп, закритий непроникною оболонкою та не зв'язаний з досліджуваним матеріалом.

Закриті джерела мають переваги: під час вимірювання вони не потребують складного захисту і в матеріалі не виникає залишкова радіоактивність.

У випробуваннях за допомогою проникальних випромінювань використовують два методи [127, 128]:

- 1) проникальної радіації, в якому застосовують потік фотонів, здатний проникати крізь товщу матеріалу, і які належать до рентгєнівського та гамма-випромінювань;
- 2) зі швидкими нейтронами.

### 3.4.1. Метод проникальної радіації

Випромінювання, що проникає крізь бетон, повітря, воду, арматуру тощо, є проникальною радіацією. Воно взаємодіє з атомами матеріалу, який знаходиться на шляху, і частково поглинається ними або розсіюється. Взаємодія між випромінюванням та атомами матеріалу тим більша, чим щільніший матеріал.

На цьому простому принципі, аналогічно розповсюдженню світла в непрозорих тілах, базується метод радіаційної дефектоскопії, визначення ступенів корозії та ущільнення бетону, товщини, діаметра, профілю, розташування арматури в бетоні та ін.

Рентгенівське та гамма-випромінювання, подібно радіохвилям та світлу, мають спільну природу – вони електромагнітні і відрізняються лише частотою коливань.

Для досліджень використовують **рентгенівські випромінювання**, які отримують гальмуванням попередньо прискорених в електричному полі електронів. На шляху електрони взаємодіють з екраном, виготовленим з важкого металу, який відіграє роль гальма. При гальмуванні електронів у речовині виникає неперервний спектр рентгенівських променів. Кванти рентгенівського випромінювання володіють властивостями частинок (фотоефект, розсіювання) та хвильовими (інтерференція, дифракція, заломлення). Довжина хвилі випромінювання залежить від частоти коливань. Чим коротша довжина хвилі, тим більша енергія випромінювання, а відповідно, проникальна здатність.

Для отримання рентгенівських променів використовують рентгенівські трубки зі значною енергією випромінювання. Для менш потужних випромінювань – бетатрон (індукційний прискорювач електронів). Останнім часом широко використовують лінійні прискорювачі електростатичної дії та прискорювачі з біжучою хвилею. Мікротрон – резонансний циклічний прискорювач. Це малогабаритні джерела випромінювання.

Інтенсивність рентгенівських променів зменшується зі збільшенням товщини перешкоди, а також за наявності щільніших включень у тілі. Наявність пустот рівноцінна зменшенню товщини перепони.

**Гамма-випромінювання** утворюється завдяки переходу нестабільних радіоізоотопів у стійкий стан. Воно супроводжується випромінюванням альфа- (ядра гелію) та бета-частинок (електрони). Енергія фотонів гамма-випромінювання у різних радіоізоотопів неоднакова. Для випробувань доцільно використовувати гамма-

випромінювання з більшою енергією, завдяки якому можна дослідити матеріали значної товщини.

Має значення і фактор періоду напіврозпаду, під яким розуміють час, після якого активність джерела знижується наполовину, як наслідок переходу частини ізотопу в стійкий стан. Якщо розпад радіоактивного джерела відбувається повільно в часі або дуже швидко, використовувати його неекономічно. Найбільш розповсюдженим джерелом випромінювання гамма-променів є радіоактивний кобальт з атомним номером.

Джерела гамма-випромінювань являють собою ампули з корозієстійкої сталі або алюмінієвого сплаву. На практиці весь комплекс устаткування називається гамма-дефектоскоп.

Фотон, що проникає в матеріал, може взаємодіяти з речовиною так:

– вільно пройти крізь матеріал, не взаємодіючи з атомами цього матеріалу;

– поглинутися атомом речовини, повністю втративши енергію на збудження електрона, який відірветься від атома. Явище вибивання електрона шляхом поглинання фотона називається фотоефектом;

– фотон взаємодіє з вільним електроном або зі слабо зв'язаним з атомом. При цьому він втрачає частину своєї енергії. В процесі взаємодії утворюється новий фотон з меншою енергією (на величину енергії переносу електрона). Новий фотон відхиляється від попереднього напрямку руху на деякий кут. Цей процес має назву комптонівського розсіювання. Комптонівське розсіяне випромінювання має більшу довжину хвилі, ніж спадне;

– фотон під час взаємодії з атомами речовини утворює пару електрон – позитрон. Позитрон, з'єднуючись з одним із електронів середовища, утворює два кванти анигіляційного випромінювання. Це процес взаємодії частинок з відповідною античастинкою, що зумовлює електромагнітне випромінювання.

Існують різні способи дефектоскопії матеріалів та визначення їх фізико-механічних властивостей.

**Радіографічний спосіб** полягає у фіксації інтенсивності випромінювання, що пройшло крізь досліджуваний об'єкт. Для цієї мети використовують рентгенівську плівку, на якій фіксується, після відповідної обробки, результат. Перевагою цього способу є те, що в руках дослідника залишається об'єктивний документ, що характеризує стан об'єкту в момент дослідження.

**Радіоскопічний спосіб** – перетворення прихованого рентге-

нівського або гамма-зображення досліджуваного об'єкта в видиме на екрані перетворювачів. Це можуть бути перетворювачі флуороскопічного, рентгенівського, електролюмінесцентного, електронно-оптичного типів. Недоліком способу є пониження точності отриманих результатів.

**Радіометричний спосіб** базується на оцінці зміни інтенсивності пучка випромінювання, що пройшов через об'єкт. Для вимірювання інтенсивності пучка променя за об'єктом використовують стінциляційні, напівпровідникові, газорозрядні лічильники або так звані іонізаційні камери. Радіометричний спосіб найбільш розповсюджений.

Розрізняють два різновиди радіометричного методу: наскрізне просвічування та розсіяне (регенеративне) випромінювання.

Метод наскрізного просвічування використовують тоді, коли товщина дослідного зразка лежить у межах допустимої (рис. 3.20).

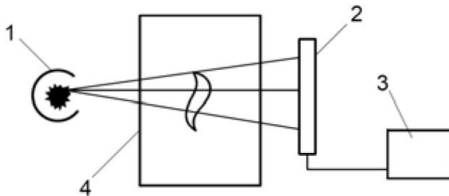


Рис. 3.20. Схема наскрізного просвічування: 1 – випромінювач; 2 – детектор; 3 – реєструвальний прилад; 4 – дослідний зразок

Під час дослідження виробів з бетону товщина наскрізного просвічування досягає близько 80 см. Повинен забезпечуватись доступ до двох протилежних поверхонь. З однієї сторони зразка встановлюють капсулу з радіоізотопом, а з протилежної – детектор, що перетворює випромінювання в сигнал, який реєструє відповідний прилад.

Дефектні місця матеріалу (тріщини, раковини і т. д.) менше послаблятимуть потік випромінювання порівняно з бездефектними ділянками. Щільніші включення знижують інтенсивність випромінювання.

Необхідно зауважити, що орієнтація однакових дефектів відносно напрямку просвічування відчутно впливає на інтенсивність затемнення зображення. Тонкі дефекти, перпендикулярні напрямку просвічування, можуть бути не виявленими під час радіаційного контролю. Тому дефекти у вигляді тріщин фіксуються тоді, коли напрям просвічування не відхиляється від напрямку розповсюдження (росту) тріщини на кут більше  $5^\circ$ .

Під час наскрізного просвічування глибину розташування дефекту можна визначити з двох позицій випромінювача (рис. 3.21)



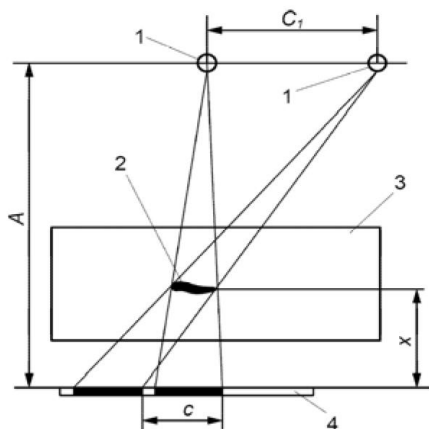


Рис. 3.21. Схема визначення глибини розташування дефекту: 1 – випромінювач; 2 – дефект; 3 – дослідний зразок; 4 – реєструвальний пристрій

З елементарних міркувань отримуємо:

$$x = cA / c + C_1, \quad (3.11)$$

Знаючи розмір відбитка на реєструвальному пристрої, можна визначити і розмір дефекту:

$$d = D(A - x) / A, \quad (3.12)$$

де:  $d$  – розмір дефекту;  $D$  – розмір його зображення.

За одностороннього доступу до об'єкта дослідження використовують метод розсіяного випромінювання (рис. 3.22).

Визначення густини матеріалу цим методом можливе лише при товщині виробу, більшій, ніж товщина так званого шару насичення для даного матеріалу. Між випромінювачем та детектором розташований розподільний екран. Сигнал від детектора передається на реєструвальний прилад. При використанні низькоенергетичних джерел випромінювання товщина шару насичення зменшується.

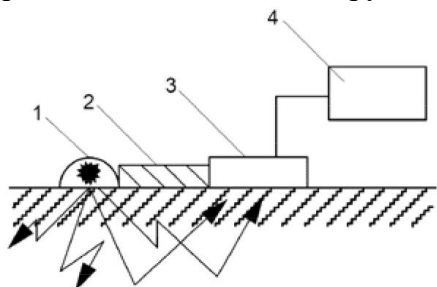


Рис. 3.22. Метод розсіяного випромінювання:

1 – випромінювач; 2 – екран;  
3 – детектор; 4 – реєструвальний пристрій

Для визначення товщини виробу необхідно заздалегідь знайти густину матеріалу. Для цього слід зважувати певний об'єм.

При використанні методу розсіяного випромінювання попередньо необхідно побудувати градувальну криву товщина виробу – інтенсивність випромінювання.

### 3.4.2. Метод швидких нейтронів

Використовується в основному для визначення вологості матеріалу і побудований на взаємодії нейтронів з ядрами водню, оскільки основна кількість цього елемента в будівельних матеріалах міститься в складі молекули води. Нейтронним методом можна визначити кількість атомів водню, що знаходяться в масі матеріалу, введенням в нього швидких нейтронів та вимірюванням кількості повільних, що утворилися в результаті взаємодії швидких нейтронів з атомами матеріалу.

На практиці швидкі нейтрони отримують бомбардуванням ядрами гелію (альфа-частинки) легких елементів, в результаті чого утворюються вільні нейтрони. Дослідницька апаратура складається з джерела швидких нейтронів, детектора теплових нейтронів, лічильника з індикатором. Для визначення вологості матеріалу використовують глибинні та поверхневі зонди. Методика визначення вологості в основному така ж, як і густини, лише замість джерела гамма-випромінювань використовують джерело швидких нейтронів.

Недоліком цього методу є те, що не можна розрізнити вільну та зв'язану воду. При застосуванні радіометричних методів досліджень необхідно особливу увагу звернути на вимоги охорони праці щодо захисту від опромінення.

## 3.5. Магнітні та електромагнітні методи

### 3.5.1. Магнітні методи

Магнітні методи контролю базуються на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей досліджуваних виробів [21, 41].

Серед них можна виділити найбільш уживані в практиці: магніто-порошковий, магнітографічний, ферозондовий. Менш вживаними, але цікавими є такі: перетворювач Холла, магнітовідривний, з використанням ефекту Баркгаузена, магнітних позначок та ін.

**Магнітопорошковий метод** – найбільш розповсюджений для знаходження дефектів, що порушують суцільність металу. Він дає змогу виявити неметалічні та шлакові включення, порожнечі, розширення, дефекти зварювання та тріщини.

Якщо досліджувану деталь помістити в магнітне поле, то в результаті орієнтації магнітних полів променів за напрямом зовнішнього магнітного поля вона намагнічується.

Магнітний потік у бездефектній зоні не міняє напрямку. Якщо

на його шляху трапляються ділянки зі зниженою магнітною проникливістю через відкритий або прихований дефекти, то частина магнітних ліній виходить за межі деталі (рис. 3.33). Там, де вони виходять з деталі і входять в неї, виникають місцеві магнітні полюси  $N$ ,  $S$  і магнітне поле над дефектом. Після зняття зовнішнього магнітного поля магнітне поле над дефектом та місцеві полюси залишаються (залишкова індукція).

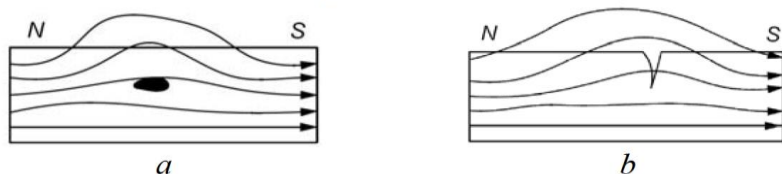


Рис. 3.33. Схема утворення магнітного поля над дефектом:  
 а – прихований дефект; б – відкритий

Для виявлення таких магнітних полів на досліджувані ділянки виробу наносять феромагнітні частинки (порошок), які орієнтуються за магнітними силовими лініями поля, через що виникає малюнок, який характеризує тип дефекту. Так, зовнішня тріщина утворює чітке скупчення порошку вздовж своїх країв. Внутрішні тріщини ініціюють розмиті смуги, орієнтовані вздовж них.

Магнітопорошковий метод дозволяє виявити тріщини з шириною розкриття 0,001 мм, глибиною 0,01 мм і більше. Однак він використовується тільки для повільних тріщин і дуже незручний для вимірювання під час дослідження.

**Магнітографічний метод** контролю полягає в записуванні магнітних полів розсіювання над дефектом на магнітну стрічку шляхом намагнічування досліджуваної ділянки деталі разом з притиснутою до її поверхні магнітною стрічкою з подальшим відтворенням і розшифруванням отриманого запису (рис. 3.24).

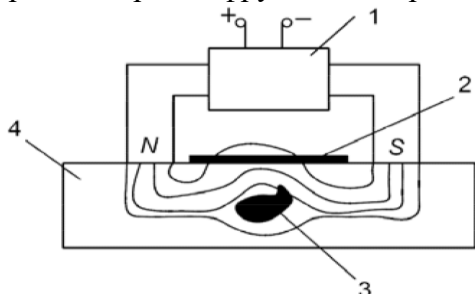


Рис. 3.24. Магнітографічний метод контролю:  
 1 – електромагніт; 2 – магнітна стрічка; 3 – дефект; 4 – деталь

Неабияке значення має напрям силових ліній магнітного поля стосовно орієнтації тріщини. Тріщини, паралельні силовим лініям

магнітного поля, не взаємодіють з ними зовсім. Найбільш чітко відображаються тріщини, перпендикулярні до таких ліній.

Для запису на магнітну стрічку розкриття тріщини необхідно, щоб вона переміщалась відносно зразка, наприклад, в напрямі, перпендикулярному росту тріщини. Використовуючи імпульсне намагнічування зразка з деякою частотою, отримуємо на стрічці ряд послідовних магнітних зображень розкриття (росту) тріщини.

Відтворюють запис за допомогою магнітофона з подальшим перетворенням сигналу і візуальним спостереженням за ним на екрані осцилографа.

**Ферозондовий метод** базується на перетворенні градієнта магнітного поля в електричний сигнал. Ним можна виявити поверхневі дефекти глибиною 0,1 мм та приховані на глибині до 10 мм.

Ферозонд (магнітоскоп) (рис. 3.25) являє собою магнітний підсилювач з розімкнутим магнітопроводом, в якому під час дії зовнішнього магнітного поля виникає електрорушійна сила (ЕРС).

За відсутності дефекту магнітні силові лінії не виходять на поверхню досліджуваного об'єкта і не взаємодіють з магнітоскопом. У зоні дефекту силові лінії огинають його і виходять на поверхню об'єкта. При суміщенні дефекту з розімкнутим магнітопроводом у магнітоскопі виникає ЕРС, що реєструється приладом.

З однієї сторони виробу та справа встановлено постійні магніти. Між ними розміщені два ферозонди, з яких сигнали надходять на вимірювальну схему (міст), яка балансується. При заданій товщині виробу струм нульовий. У разі відхилення товщини схема розбалансовується і струм набуває певного значення. Шкала приладу може бути проградуїрована у відповідних одиницях.

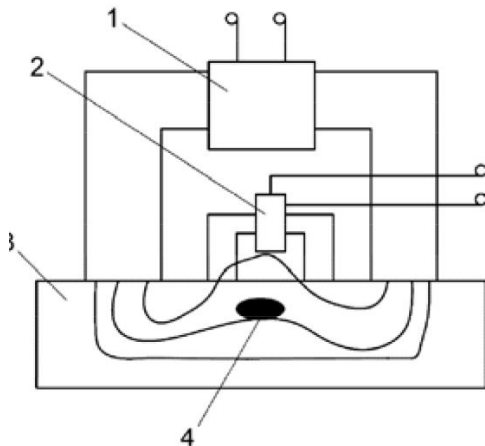
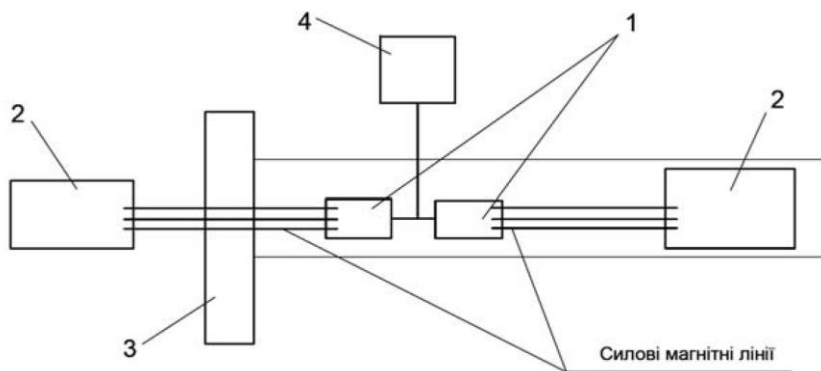


Рис. 3.25. Схема магнітоскопа:

1 – електромагніт; 2 – ферозонд; 3 – дефект; 4 – дослідний зразок

Ферозондовим методом можна вимірювати та контролювати товщину деталей на поточних лініях. Принцип роботи такого устаткування показано на *рис. 3.26*.



*Рис. 3.26.* Схема визначення товщини виробу:  
1 – ферозонд; 2 – постійний магніт; 3 – виріб; 4 – прилад

**Магнітовідривний метод** (пондеромоторний) використовується для контролю товщини немагнітного покриття на матеріалах, що намагнічуються. Принцип дії приладу (магнітний товщиномір) базується на зміні зусиль відриву магніту від матеріалу залежно від товщини покриття. Величину зусилля можна визначити пружинним динамометром або вимірюючи струм намагнічування електромагніту. Шкала приладу проградуєвана в одиницях товщини покриття.

Метод, що базується на **ефекті Холла**, застосовують для виявлення дефектів та в приладах для вимірювання товщини, контролю структури та механічних властивостей. Ефект Холла полягає в тому, що коли прямокутну пластинку з напівпровідникового матеріалу помістити в магнітне поле перпендикулярно до вектора напруженості і пропускати крізь неї струм в напрямі двох протилежних граней, то на двох інших гранях виникне ЕРС, пропорційна напруженості магнітного поля. Використовуючи такі пластинки як давачі, розташувавши в одній площині значну їх кількість, можна створити екран, який, подібно рентгеновському, відобразить матеріал з дефектами, "просвічений" магнітним полем.

Цікавим методом дослідження процесів руйнування є метод з використанням **ефекту Баркгаузена**. Суть його полягає у стрибкоподібній зміні намагнічування феромагнітних матеріалів за неперервної зміни зовнішніх умов, наприклад магнітного поля.

Причиною ефекту Баркгаузена є різноманітні неоднорідності в кристалічній структурі феромагнетика, що заважають перебудові маг-

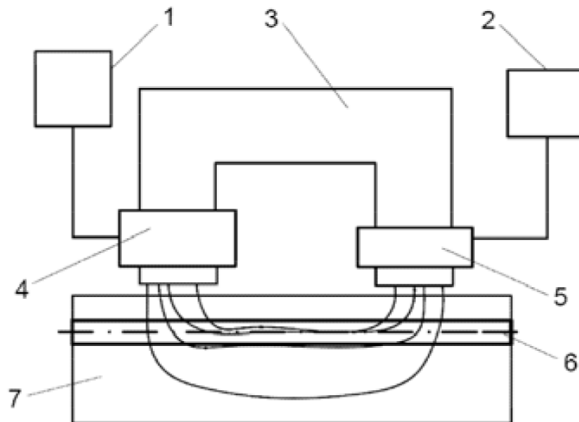
нітної структури. Так, ріст тріщини супроводжується пружним розвантаженням ділянки, в яку входить кінець тріщини. Отже, якщо феромагнітний зразок намагнітити до насичення, то ріст тріщини супроводжуватиметься стрибкоподібною зміною намагнічування в ділянці, що межує з кінцем тріщини. Давачі, розташовані в ділянці тріщини, виробляють імпульси, які можна аналізувати, обробивши їх на ПК.

### 3.5.2. Електромагнітні методи

До електромагнітних неруйнівних методів контролю матеріалу можна віднести метод електромагнітної індукції та метод поглинання електромагнітних хвиль; їх використовують для виявлення арматури в бетоні, а також вологості в самій конструкції [127, 128].

Принцип методу **електромагнітної індукції** полягає ось у чому. Бетон складається з матеріалів з низкими магнітними характеристиками (суміш речовин діамагнітних та парамагнітних), а також містить арматуру з високими магнітними параметрами і частково речовини, що відносяться до феромагнетиків. Тому магнітне поле, яке у виробі з бетону було рівномірним, з введенням арматури міняє малюнок, концентруючи силові лінії вздовж стержня арматури.

Прилади для виявлення арматури в бетоні, засновані на методі електромагнітної індукції, називаються пахометрами або конверметрами. Принцип дії такого приладу показано на *рис. 3.27*.



*Рис. 3.27.* Схема пахометра:

- 1 – генератор; 2 – приймач; 3 – магнітопровід; 4 – котушка генератора;
- 5 – котушка приймача; 6 – металева арматура; 7 – бетонний виріб

На спільному магнітопроводі, виготовленому з м'якого феромагнітного матеріалу, розміщені котушки індуктивності. Ліва котушка живиться змінним струмом з генератора і створює магнітне поле, си-

лові лінії якого перетинають котушку індуктивності приймача. В ній індукується змінний струм, величина якого реєструється приймачем і змінюється залежно від відстані арматури до магнітопроводу.

Методом електромагнітної індукції можна виміряти товщину захисного шару над арматурою у бетонній конструкції. Серед вітчизняних приладів, що працюють на такому методі слід відзначити прилад ВЗС (вимірювач захисного шару) та прилад Максимова для визначення напружень у металі.

Метод **поглинання електромагнітних хвиль** ґрунтується на властивості різних матеріалів, залежно від діелектричної постійної, порізноmu поглинати електромагнітні хвилі, що пронизують матеріал.

Розглядаючи воду як полярний діелектрик, у якого молекули є диполі з відповідним електричним моментом, не важко зрозуміти явище поглинання водою електромагнітних хвиль. За відсутності зовнішнього електричного поля молекули-диполі розташовані хаотично внаслідок теплових коливань молекул; при дії електричного поля диполі орієнтуються своїми позитивними зарядами до поля, поглинаючи при цьому частину енергії зовнішнього поля.

Існує залежність поведінки молекул-диполей від частоти зовнішнього поля. Зі збільшенням частоти поглинальна потужність диполей зменшується. Оптимальною для визначення води в бетонах є межа від 3000 до 6000 МГц.

Основні труднощі, пов'язані з визначенням вологості бетону електромагнітним методом, полягають в тому, що електричні властивості його залежать не лише від наявності в ньому води, але і від кількості та природи розчинених солей. При низьких частотах спостерігається велика залежність питомої провідності дистильованої води та річкової і морської. Лише при частотах вище 2000...3000 МГц ця залежність зменшується. Вимірювання поглинання електромагнітних хвиль у воді залежно від температури показали, що її ростом поглинання зменшується. Вода, яку виявляють у бетоні, може знаходитись у таких станах:

1) кристалізована і хімічно зв'язана, її виявити електромагнітним методом неможливо;

2) фізично зв'язана. Фізичні властивості такої води і, зокрема електричні, дуже відрізняються від звичайної. Абсорбція її електромагнітних хвиль незначна. Для визначення даних про фізично і хімічно зв'язану воду існує метод, заснований на використанні повільних нейтронів;

3) не зв'язана (вільна, тобто така, яка переміщується в бетоні

під дією гравітаційних або капілярних сил). Цю воду можна виявити методом поглинання електромагнітних хвиль.

Визначається поглинання електромагнітних хвиль повітряного шару товщиною, що відповідає товщині досліджуваного бетонного зразка. Далі вимірюється поглинання бетонного зразка.

Різниця показників вимірювання (в Дб) є величиною, за якою з допомогою тарувального графіка визначають вміст води на квадратний сантиметр площі.

Тарувальну криву вологість – поглинання з урахуванням температурної залежності слід будувати за даними паралельних вимірювань, проведених двома методами.

Далі перераховують кількість води з площі в об'ємну вологість бетону.

Вплив арматури на поглинання електромагнітних хвиль залежить від її положення відносно напрямку проходження хвиль.

При паралельному напрямі арматури і розповсюдженні хвиль вплив металевих стержнів незначний.

Комбінуючи метод визначення повної кількості атомів водню в бетоні, заснований на уповільненні швидких нейтронів, з методом визначення вмісту не зв'язаної води на основі поглинання електромагнітних хвиль, можна досить точно визначити кількість цементу на одиницю об'єму бетону.

### 3.6. Оптичні методи досліджень

Під оптичними методами розуміють сукупність методів, заснованих на взаємодії світла з поверхнею тіла, що рухається, або з дефектом поверхні [41].

Реєструвальними приладами в системах оптичних досліджень можуть бути око, світлочутливий шар фотоплівки, телевізійна камера і т. д. Каналом, по якому світло передається від предмета до реєструвального приладу, може служити система дзеркал та лінз, а також світлопровідники різних конструкцій.

Оптичні методи широко застосовують під час досліджень процесів руйнування. Для вимірювання довжини повільного росту тріщини використовують катетометри.

**Катетометр** – оптичний прилад для вимірювання віддалі між двома точками (наприклад, між кінцем тріщини і якоюсь постійною точкою на зразку). Це зорова труба, що пересувається по напрямній. Величину переміщення відраховують за показниками шкали мікрометричного гвинта. Точність вимірювання – декілька мікрон.



Недоліком оптичного методу з використанням катетометра є те, що з його допомогою можна досліджувати лише дефекти (тріщини) на поверхні зразка.

Цікавим і новим методом неруйнівного контролю є **голографічна дефектоскопія**. Суть його полягає в можливості порівнювати два або декілька малюнків інтерференційних смуг, що характеризують просторове переміщення точок поверхні зразка.

Для цього необхідно отримати фотографічне зображення об'єкта у вигляді голограми. На відміну від фотографії, яка фіксує тільки інтенсивність світла і створює плоске зображення об'єкта, голограма дає можливість отримати хвильовий фронт світлового променя і відтворює тривимірне зображення предмета.

Принцип створення голограми полягає у використанні двох світлових хвиль: одна опромінює об'єкт (предметна хвиля), друга (опорна) служить для утворення однорідного когерентного фону.

Під час взаємодії цих хвиль виникає добре відомий в оптиці інтерференційний малюнок, який несе повну інформацію про просторову структуру світлової хвилі (за амплітудою і фазою). Записана на фотоматеріал інтерференційна голограма підлягає поновленню способом освітлення її когерентним пучком променів світла, що використовувались для її отримання.

У результаті дифракції на мікронеоднорідностях голограми світло, що падає на неї, перерозподіляється і зображення поновлюється (рис. 3.28 і 3.29).

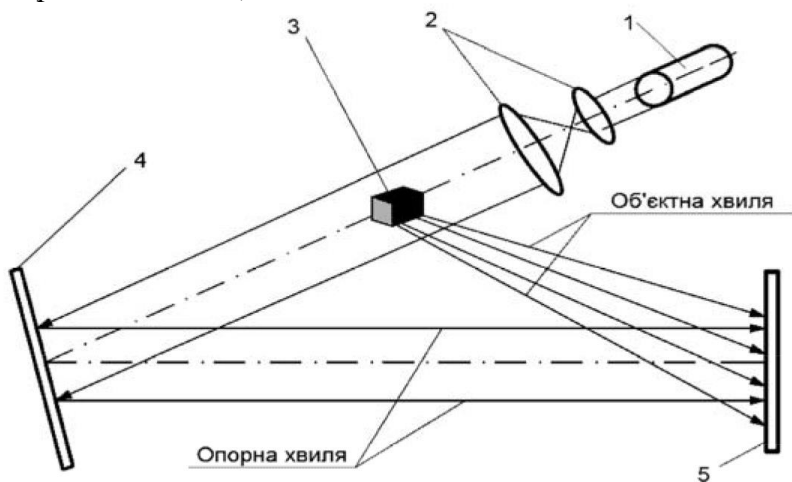


Рис. 3.28. Схема установки для отримання голограми:  
1 – лазер; 2 – об'єктив; 3 – об'єкт; 4 – дзеркало; 5 – фотопластину

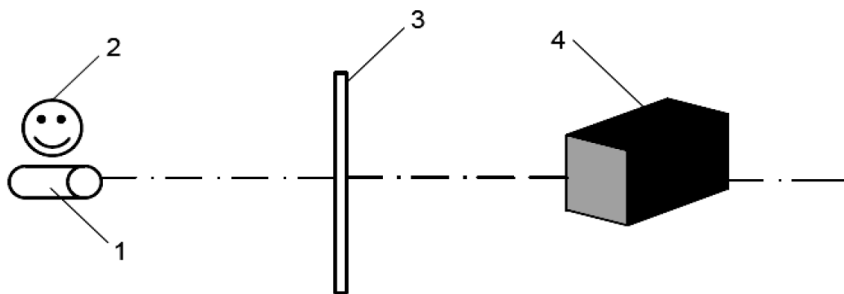


Рис. 3.29. Схема установки для поновлення зображення:  
1 – джерело світла; 2 – спостерігач; 3 – голограма; 4 – зображення об'єкта

Джерелом випромінювання когерентних хвиль здебільшого є лазерні установки, що випромінюють у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах.

Використовуючи метод голографії, можна отримати тривимірне зображення предмета, яке нібито покрите інтерференційними смугами. Наявність інтерференційних смуг на зображенні предмета говорить про те, що він зазнав деформації, зміщення або обертання.

Можлива ресстрація голографічного зображення предмета на фотопластину двічі, через певний проміжок часу. Такий метод називається **двохекспозиційною голографічною інтерферометрією**.

Спочатку на фотопластину записують голограму предмета в початковому, ненавантаженому стані. Далі його навантажують певними зусиллями і здійснюють другу експозицію на ту ж саму фотопластину. Після обробки фотопластини й освітлення її хвилиною, ідентичною опорній, можна побачити тривимірне зображення предмета з накладеним на нього малюнком інтерференційних смуг. Визначення величини зміщення за допомогою інтерферометрії показано на прикладі навантаження консольної балки (рис. 3.30).

Кожна точка балки рухається тільки в напрямі  $x$ . В початковому положенні всі точки лежать у площині  $x = 0$ . Після зміщення кожна з точок набуває нового положення, що описується функцією  $x = X(z)$ .

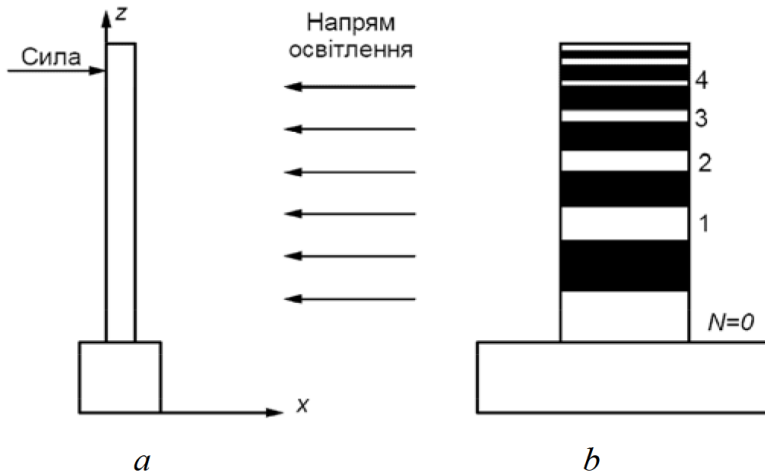
Дамо номер кожній світлій смузі на інтерференційному малюнку:

$$X(z) = \frac{N\lambda}{2}, \quad (3.13)$$

де:  $N$  – номер смуги;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера.

Використовуючи формулу, можна знайти зміщення, перерахувавши смуги до заданої точки. Для складних поверхонь, що під-

даються тривимірній деформації, проводиться додатковий складний математичний аналіз інтерферометри.



*Рис. 3.30.* Деформація консольної балки:  
*a* – вигляд на балку збоку; *b* – інтерференційний малюнок на передній поверхні балки

Цікавим і корисним у використанні голографічної інтерферометрії є спостереження і вимірювання механічних вібрацій непрозорих об'єктів. Якщо під час отримання голограми поверхня об'єкта коливається, поновлене зображення його поверхні промодульовано системою інтерференційних смуг. Найбільш яскрава смуга збігається з ділянкою поверхні, яка є нерухомою під час вібрації. Крім найбільш яскравої смуги, на голографічному зображенні може спостерігатись ще декілька смуг, кожна з яких відповідає геометричному місцю точок, що вібрують з постійною амплітудою. Коли коливання об'єкта синусоїдальні, він більшу частину часу знаходиться поблизу двох положень максимального зміщення, в яких його швидкість дорівнює нулю.

Метод, в якому під час отримання голографічної інтерферограми об'єкт переміщується, називається **голографічною інтерферометрією, усередненою в часі**. Якісно така голограма подібна на двохекспозиційну голографічну інтерферограму, на якій з'являються смуги, що відповідають зміщенню об'єкта між двома крайніми положеннями.

Розглянемо консольну балку, один кінець якої жорстко закріплений. Балка синусоїдально вібрує відносно свого положення рівноваги (*рис. 3.31*).

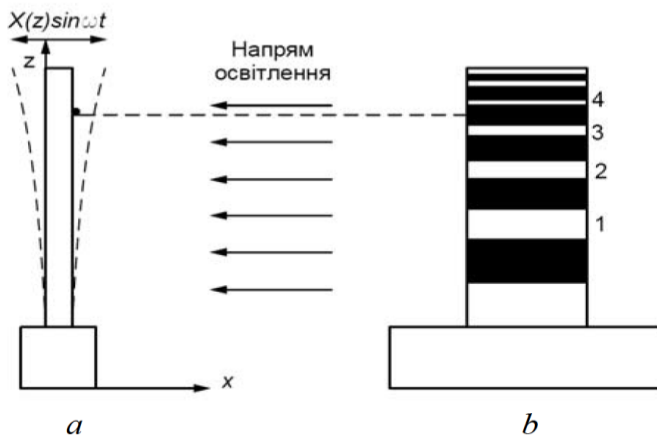


Рис. 3.31. Вібруюча консольна балка

Інтерференційний візерунок, що спостерігається на передній поверхні балки, показано на рис. 3.31, b. Точка P (рис. 3.31, a) лежить у центрі четвертої темної смуги. Амплітуду вібрації в точці P можна знайти за допомогою таблиці нулів функції Бесселя.

Так, для четвертого нуля коефіцієнт дорівнює 11,7915.

З формули освітленості:

$$\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)X(P) = 11,7015, \quad (3.14)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі освітлення.

Тоді 
$$X(P) = 11,7915(\lambda/2\pi) = 0,9388\lambda. \quad (3.15)$$

Аналогічно можна знайти амплітуди в будь-яких інших точках.

До переваг голографічної інтерферометрії слід віднести високу чутливість і відсутність необхідності попередньої підготовки поверхні об'єктів. Розвиток цього методу стримує досить висока вартість обладнання.

### 3.7. Інші методи неруйнівного контролю

#### 3.7.1. Метод капілярної дефектоскопії

Ґрунтується на капілярному проникненні індикаторних рідин (пенетрантів) у порожнини дефектів і фіксації цього явища. Основні методи капілярної дефектоскопії діляться залежно від параметра, спостереження за яким дозволяє встановити дефект. У групу основних методів входять кольоровий, яскравий, люмінесцентно-кольоровий, відфільтрованих частинок. Крім того, в будівництві широко використовують різновидності методу відфільтрованих ча-

стинок – перевірка щільності зварного з'єднання крейдианим порошком, метод хімічної реакції, вакууму.

Під час контролю порошком на досліджувану поверхню наносять крейдяний розчин. На протилежну – розчин (гас), який, просочуючись через дефект, створює жовті плями на побіленій крейдою поверхні [127, 128].

**Метод хімічної реакції** полягає в тому, що на одну поверхню наноситься індикатор (фенолфталеїн), а з протилежного боку створюється надлишковий тиск реагенту (аміак). За наявності дефекту (нещільність) на поверхні з індикатором з'являються темні плями.

**Методом вакууму** контролюють, створюючи над досліджуваною поверхнею розрідження (вакуумна камера), попередньо нанісши на неї пінний індикатор. За нещільності поверхні з'являються бульбашки повітря, що просочились через дефект.

Метод використовується за одностороннього доступу до об'єкта.

**Метод середовищ, що протікають.** Цей метод можна поділити на два: метод протікання рідин і капілярний [127, 128]. Перший використовують для контролю герметичності резервуарів, трубопроводів, газопроводів та інших подібних споруд.

При випробуванні водою перевірні ємності заповнюються до відмітки, яка перевищує експлуатаційний рівень. У закритих посудинах тиск рідин підвищується додатковим нагнітанням води або повітря. Окремі шви металоконструкцій можуть перевірятися сильним струменем води із брандспойта, направлено нормальнo до поверхні шва під тиском біля 1 атм. За наявності дефектів вода просочується крізь нещільності з'єднання.

Ефективним для виявлення тріщин є керосин. Завдяки малій в'язкості і незначному поверхневому натягу, порівняно з водою, він легко проникає крізь пори та тріщини і виступає на протилежній стороні виробу. Поверхню шва з однієї сторони сильно змочують або збризкують керосином, а протилежну попередньо білять водним розчином крейди і висушують. За наявності тріщин на сухому світлому фоні чітко простежуються іржаві плями та смуги просочування керосину.

Суть простішого способу, в основі якого використання стиснутого повітря, – в обдуванні швів з однієї сторони під тиском 4 атм. і перпендикулярно до поверхні. Протилежна поверхня попередньо змазується мильною водою. Утворення мильних бульбашок вказує на наявність скрізних тріщин.

Ефективні ультразвукові шукачі протікань для фіксації ультра-

звукових коливань, які виникають під час протікання повітря із тріщин. З їх допомогою можна виявити нещільності до 0,1 мм за додаткового тиску 0,4 атм і встановити місце знаходження дефекту з точністю до 2 см. Під час перевірки особливо відповідальних конструкцій використовують замість повітря хімічні реагенти (повітряно-аміачну суміш та ін.), які володіють високою проник-ливістю.

Тріщини можна також зафіксувати шляхом створення вакууму (рис. 3.32).

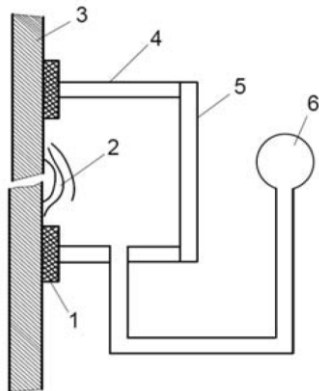


Рис. 3.32. Схема вакуумної установки:

- 1 – гумові ущільнювачі; 2 – мильні бульбашки; 3 – дослідна конструкція;
- 4 – коробка; 5 – прозора поверхня;
- 6 – вакуум-насос

Конструкція 3 змазується мильною водою і до неї кріпиться коробка 4, без дна з прозорою поверхнею 5. Гумові ущільнювачі 1 запобігають доступу повітря ззовні. Коробка підключається до вакуум-насоса 6. Поява мильних бульбашок 2 свідчить про наявність тріщин. Вказаний спосіб зручний тим, що використовується при доступі до конструкції тільки з однієї сторони.

Для виявлення невидимих неозброєним оком тріщин використовують **капілярний метод**. Ним виявляють дефекти утворенням індикаторних рисунків з високими оптичними (яскравим і кольоровим) контрастами і з шириною ліній, яка перевищує ширину розкриття дефектів.

Під час контролю (рис. 3.33, а) на конструкцію 3 наносять спеціальну рідину 1 (індикаторний пенетрат), яка під дією капілярних сил заповнює порожнини 2 поверхневих дефектів. Дефекти виявляють за рідиною, яка залишилась в їх порожнинах, після ліквідації її з поверхні, або за накопиченням частинок порошку в рідині і відфільтрованих на поверхні при заповненні порожнин дефекту рідиною (рис. 3.33, б). У першому випадку рідину, яка залишилась у порожнинах дефекту (рис. 3.33, с), виявляють після нанесення проявника 4, який вбирає її, утворюючи індикаторний візерунок 5, а також фон, який покращує його видимість.

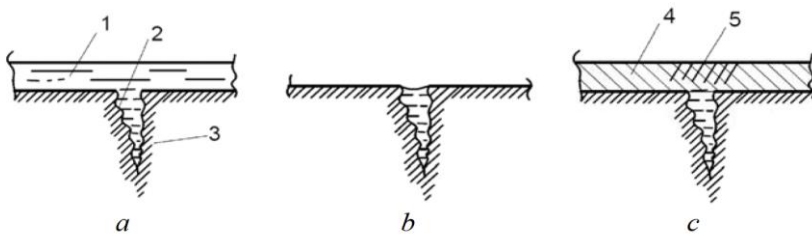


Рис. 3.33. Схема контролю капілярним методом з використанням проявника: 1 – рідина (індикаторний пенетрат); 2 – поверхневий дефект; 3 – дослідна конструкція; 4 – проявник; 5 – індикаторний візерунок

Індикаторні візерунки, які утворюються під час контролю, або володіють здатністю люмінесцювати в ультрафіолетових променях, або мають забарвлення, викликане збірним поглинанням (або відбиттям) частин світлових променів, що на них падають. Лінії індикаторного рисунка мають ширину 0,05...0,3 мм і яскравий контраст 30...60% і більше, а також значний кольоровий контраст.

При яскравій капілярній дефектоскопії як індикаторний пенетрат використовують керосин та спеціальні оливи або їх суміші.

Як проявник – крейду у вигляді сухого порошку, водяної суспензії з добавками поверхнево-активних речовин або суспензії на основі органічних розчинників. Індикаторний пенетрат просочується у шар крейди і викликає його потемніння, яке виявляється при денному світлі. Цей спосіб має малу чутливість, але широко використовується для пошуку скрізних тріщин.

У кольоровій дефектоскопії використовують індикаторні пенетрати або реактиви, які після нанесення проявника утворюють індикаторний візерунок, що добре проглядається на білому фоні проявника. При люмінесцентній дефектоскопії використовують пенетрат, який проникає і здатний люмінесцювати під впливом ультрафіолетових променів. Індикаторний рисунок розглядається на темному фоні, найяскравіший і кольоровий контраст забезпечується при білому, червоному або оранжевому кольорах люмінесценції. При люмінесцентно-кольоровій дефектоскопії індикаторні рисунки не тільки люмінесцюють в ультрафіолетових променях, але мають забарвлення, яке виникає через збірне поглинання частиною світлових променів. Під час використання фільтрувальних частин індикаторний пенетрат містить забарвлені або люмінесційні повислі частинки, які осідають при поглинанні пенетрату пористим матеріалом. У зоні розташування дефекту рідина поглинає швидкі й у більшому об'ємі, що зумовлює більшу концентрацію повислих частинок.

При підготовці до дефектоскопії поверхні повинні бути добре очищені та висушені. Необхідно дотримуватись відповідних вимог техніки безпеки.

### 3.7.2. Метод різниці електричних потенціалів

Ефект взаємодії тріщини зі струмом, що проходить через зразок, широко використовується для визначення довжини тріщини. Ріст тріщини супроводжується збільшенням електричного опору зразка через зміну геометрії зразка і відповідну зміну поля електричних потенціалів у ділянці тріщини. Різниця електричних потенціалів  $\varphi$  залежить від сили струму, що проходить крізь зразок, площі поперечного перерізу зразка та електроопору матеріалу зразка [127, 128].

Різниця електричних потенціалів між довільними точками на зразку визначає довжину тріщини за умови постійності струму через зразок. Ця залежність, виведена за допомогою тарувальної кривої, є статичною характеристикою: різниця електричних потенціалів – довжина тріщини.

Для плоского зразка (рис. 3.34) з центральною тріщиною, коли товщина зразка набагато менша за ширину, залежність має вигляд

$$\varphi = \frac{\rho I}{bt} \sqrt{l^2 + y^2}, \quad (3.16)$$

де  $y$  – віддаль між точками вимірювання, розташованими по осі зразка симетрично відносно тріщини.

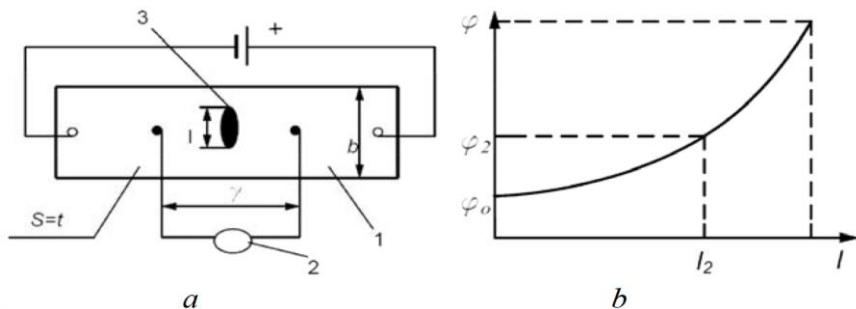


Рис. 3.34. Метод різниці електричних потенціалів:  
*a* – схема дослідження; *b* – тарувальна крива: 1 – зразок;  
 2 – вимірювальний прилад; 3 – тріщина

### 3.7.3. Метод вихрових струмів

Принцип методу полягає в реєструванні зміни електромагнітного поля збуджувальної котушки під дією електромагнітного поля вихрових струмів, які наводяться цією котушкою в металевому предметі [64, 128].



Інтенсивність вихрових струмів залежить перш за все від електропровідності, магнітної проникливості та геометрії зразка, а також віддалі між котушкою та поверхнею предмета. Дефекти суцільності металу, до яких відноситься тріщина, є перепорою для вихрових струмів і діють подібно збільшенню опору матеріалу зразка. Крім того, тріщина впливає на інтенсивність вихрових струмів. Зворотна дія цих струмів на збуджувальну котушку залежить і від їх сили, і від їх геометрії. Для дослідження використовують стандартні вимірювальні прилади.

На сигнали вихрових перетворювачів (котушка) практично не впливають параметри навколишнього середовища. Водночас цьому методу властиві недоліки: він використовується лише для металів; дозволяє контролювати метали на незначну глибину (виявляти поверхневі тріщини).

### **3.8. Висновки до розділу 3**

На основі багаторічних досліджень, випробувань та обстежень натурних будівель і споруд та аналізу одержаних результатів неруйнівними методами і врахування сучасних надбань фізики, яка по суті створила неруйнівні методи дослідження, можна зробити такі висновки:

1. Описано та стандартизовано визначення фізико-механічних властивостей матеріалів неруйнівними методами. Зокрема, на непрямому визначенні властивостей і характеристик об'єкта випробувань і їх класифікують за видами випробувань так: метод проникнення середовищ; механічні методи випробування, акустичні методи, оптичні методи, магнітні методи, радіаційні методи, теплові методи, радіохвильові та електричні методи випробувань. Ці методи не порушують експлуатаційних властивостей матеріалів. Потрібно зазначити, що неруйнівні методи мають деякі переваги над руйнівними. Зокрема, зберігають цілісність контролюючої конструкції, дають можливість багаторазового випробування, порівняно мала трата часу на проведення досліджень та дають можливість визначення потрібної характеристики у будь-якій точці. Представлено також орієнтовну схему класифікації неруйнівних методів, які викладені у різних розділах фізики та представлено схему комбінованих методів дубляжа для надійності випробувань.

2. Розглянуто механічні методи визначення поверхневої твердості матеріалів. Зокрема, визначення твердості, що базується на відскоку та на відбитку також інші методи визначення поверхневої твердості, – це метод висмикування, метод відриву та метод сколю-

вання.

3. Опрацьовано акустичні методи дослідження міцності конструкцій, що базується на розповсюдженні хвиль у суцільному середовищі. Зокрема резонансний, ультразвуковий, ударний методи та метод акустичної емісії.

4. Сучасні досягнення атомної фізики дали змогу застосування радіаційних методів для визначення властивостей матеріалів і конструкцій, зокрема, розроблено такі методи: метод проникаючої радіації де використовують рентгенівські випромінювання – гама випромінювання та різні способи використання, – радіографічний, радіоскопічний, радіометричний та спосіб швидких нейтронів.

5. Для визначення дефектів і різного виду виключень пустоти розшарування, та дефекти при зварюванні можна використовувати магнітні та електромагнітні методи. Зокрема, магнітні методи використовують такі: магнітопорошковий, магнітографічний, ферозондовий та магнітовідливний методи, що базуються на ефекті Холла та ефекті Баркхаузена. Електромагнітні методи базуються на електромагнітній індукції та поглинанні електромагнітних хвиль використовуючи властивості матеріалів, які по-різному поглинають електромагнітні хвилі.

6. Описано та сформульовано оптичні методи дослідження які базуються на взаємодії світла з поверхнею тіла, або з дефектом поверхні. Зокрема, для вимірювання довжини повільного росту тріщини – використовують катетометр – оптичний прилад. Новим методом можна сказати є і голографічна дефектоскопія. Різновид цього методу є двох експозиційною голографічною інтерферометрією і якщо предмет, що досліджуємо то називається метод голографічною інтерферометрією усередненою в часі.

7. Ґрунтовно розглянуто та проаналізовано інші методи неруйнівного контролю. Зокрема такі як, метод капілярної дефектоскопії, який ґрунтується на створенні плям на набіленій крейдою поверхні, метод хімічної реакції, який базується на створенні темних плям у місці дефекту, метод вакууму – створюючи розрідження над досліджуваною поверхнею, попередньо нанісши індикатор та метод середовищ що протікають і капілярний метод для виявлення невидимих тріщин. Використовують також метод різниці потенціалів який базується на ефекті взаємодії тріщин зі струмом та метод вихрових струмів, тріщина в якому є перепоною для вихрового струму.

## 4. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ

### 4.1. Загальні відомості

Випробувальні машини та преси є основним обладнанням механічних дослідних лабораторій. Преси призначені для стискання зразків матеріалів та елементів конструкцій. Вони виконуються з гідравлічним або механічним приводом. Стискальні зусилля знаходяться в межах від декілька до тисячі тон. Потужні преси містять лише гідравлічний привід. Спеціальні пристрої дозволяють випробувати не тільки на стиск, а й на інші види деформацій [81, 128].

В деяких випадках, крім пресів з пристроями, використовують спеціальні та універсальні випробувальні машини, наприклад, для вимірювання зусиль розтягу. Основними механізмами тут є переміщення одного з захватів та вимірювання зусилля опору зразка. Залежно від розташування осі зразка випробувальні машини розподіляють на горизонтальні та вертикальні.

В будівельних лабораторіях використовують машини та преси, що забезпечують максимальні зусилля від 5 до 80 МН. Це гідравлічні преси ИПС-500, ПММ-1000, 2ПГ-500, ГРМ-2А, універсальні Р-5, УМ-5 та ін.

Однак габарити деяких будівельних конструкцій є значними, що обмежує вживання універсальних машин та пресів, тоді використовують стенди. Розрізняють тимчасові розбірні та стаціонарні стенди.

Тимчасові розбірні застосовують у тому випадку, коли конструкцію випробовують нерегулярно і не масово, наприклад стенди, які встановлюють на будівельних майданчиках або полігонах.

Стаціонарними стендами обладнують дослідні лабораторії та лабораторії великих заводів будівельних конструкцій, де необхідно систематично перевіряти якість продукції.

Розрізняють два види таких стендів: з вертикальний та горизонтальним розташуванням конструкції.

На практиці частіше використовують вертикальні.

Залежно від розташування домкратів, що створюють випробувальні зусилля, розрізняють стенди з домкратом на рівні верхнього поясу конструкції та на рівні підлоги приміщення. Перевага надається другій схемі, оскільки для установки домкратів та спостереження за процесом їх роботи у першому випадку необхідно створити спеціальні рихтування та площадки.

Основною частиною стенда є масивна залізобетонна силова плита, яка сприймає зусилля, що розвиваються гідравлічними домкратами. Вона є опорою для конструкції; в ній розміщені анкерні

щілини, в які заанкеруються тяги, що утворюють з силовою плитою та верхньою траверсою замкнутий контур, необхідний для створення домкратами навантаження на конструкцію.

Конструкцію, як правило, випробовують у робочому положенні, в якому вона працює в будівлі чи споруді.

З метою механізації та зменшення трудоемності випробувань застосовують механізовані стенди.

#### **4.2. Стенд для випробування балкових залізобетонних конструкцій**

Більшість основних конструкцій у сучасному капітальному будівництві споруджується із різноманітних залізобетонів. Об'єми виробництва сягають значних цифр. За таких масштабів особливо важливо забезпечити технічний прогрес у цій галузі [127, 128].

Відсутність стандартних випробувальних стендів, установок та іншого обладнання суттєво відбивається на надійності об'єктів, гальмує впровадження нових видів бетонів із місцевих будівельних матеріалів.

Для проведення досліджень і паспортизації виробів заводи будівництва часто змушені транспортувати вироби за декілька сотень кілометрів, що призводить до значних матеріальних затрат і руйнування конструкцій. Деякі підприємства викопують випробування на нестандартному обладнанні, навантажуючи конструкції бетонними блоками й іншим вантажем. Недоліком існуючих стендів є невисока точність, особливо це стосується широких плит внаслідок відхилення їх від нульової площини, що викликає нерівномірне розподілення навантаження в площині завантаження плити, а також обмежені функціональні можливості, оскільки з їх допомогою неможливо випробувати балкові конструкції різних типорозмірів.

На *рис. 4.1* подана конструктивна схема стенда для випробування балкових конструкцій, зокрема плит перекриттів, на міцність, тріщиностійкість і деформативність при чотириточковому згині [5, 111].

Стенд є збірно-розбірним для можливого переміщення у разі виробничої необхідності.

Забезпечивши стенд механізованими регульованими приводами бази випробувань і змінюючи віддаль між навантажувальними інденторами-траверсами, можна досліджувати балкові конструкції різних типорозмірів.

За допомогою механізму коректування перекосів і взаємодіючого з ним пристрою замірювання відхилень від нульової площини можна ліквідувати і заміряти відхилення від площини.

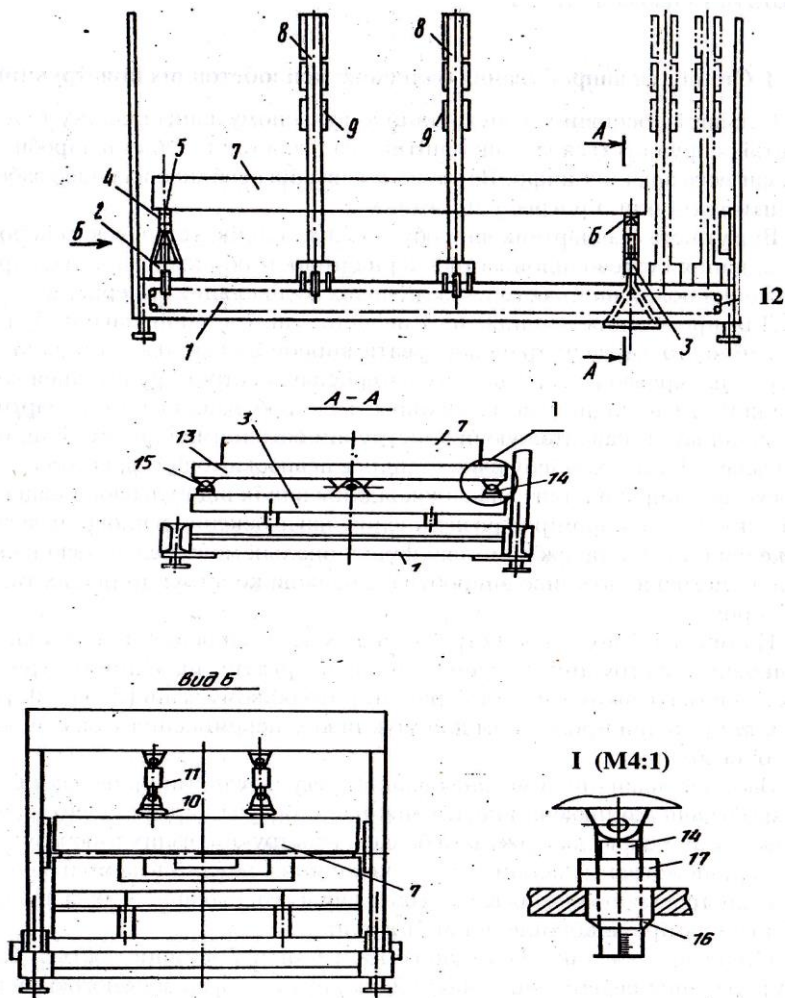


Рис.4.1. Конструктивна схема стенда.

Стенд працює так. За типорозміром плити 7 встановлюється база випробування переміщення опори 2, яка рухається за допомогою електромеханічного приводу 12. Після цього на рухомі та нерухомі опори 3 встановлюється плита 7 симетрично до поздовжньої осі стенда; рухомі рами 8 з навантажувальними пристроями 9 знаходяться поза межами бази випробування. Одночасно механізм коректування перекосів 13 повертає верхню частину нерухомої опори 3 так, щоб контакт з плитою проходив по всій її ширині. За допомогою гвинтових опор 14 і 15 фіксується положення верхньої частини нерухомої опори й одночасно заміряється величина відхилення плити від нульової площини. На основі даних вимірювань можна

контролювати якість плити за геометричним розміром. Далі за допомогою електромеханічного приводу 12 рухомі силові рами 8 з навантажувальними пристосуваннями 9 встановлюються і фіксуються в потрібному для даного типорозміру плити положенні.

Плиту за силовою схемою чотириточкового згину згідно з ГОСТ 8865-78 навантажують гідродомкратами подвійної дії 11, які працюють від автономної гідростанції. Зусилля від гідродомкратів передаються через навантажувальні індентори-траверси 10, циліндричні катки 4 та сталеві пластини 5 і 6 на плиту 7.

Наявність механізованих і регульованих приводів бази випробування і зміна віддалі між навантажувальними інденторами-траверсами дає можливість досліджувати балкові конструкції різних типорозмірів з зменшеними затратами. Забезпечення стенда контрольно-регульовальними механізмами коректування перекосів балкових конструкцій та пристроєм вимірювання відхилень від нульової площини дозволяє підвищити точність і якість випробування.

Завдяки стенду зменшуються енерговитрати у зв'язку зі скороченням тривалості випробування; регулюється навантаження, щоб запобігти руйнуванню конструкції, що дозволяє використання її надалі; підвищується надійність випробування.

### **4.3. Стенд для випробування стінових панелей СВСП-1**

Відомі методики та стенди для випробування будівельних залізобетонних конструкцій мають ряд суттєвих недоліків, головними із яких є недостатня точність результатів під час досліджень відносно широких стінових панелей внаслідок відхилення їх від нульової площини, центрування, а також обмежені можливості (наприклад, не можна випробовувати стінові панелі різних типорозмірів).

Стенд СВСП-1 (*рис. 4.2.* та *рис. 4.3.*) – це випробувальна техніка підвищеної точності з розширеними функціональними можливостями внаслідок забезпечення його механізованими регульованими приводами [104, 127, 128].

Будова і схема функціонування стенда такі (*рис. 4.2.*). Вихідне положення. Поршні гідродомкратів 4 знаходяться в нижньому крайньому положенні. Гайками регулюється довжина тяг 15, яка забезпечує щільність між нижньою 12 і верхніми 14 поверхнями траверси  $50 \pm 5$  мм. Траверса 12 рухається у крайній лівий стан, тобто у зону завантаження. Балки 18 із вертикального положення переходять у горизонтальне. Перед початком встановлення і під час переміщення панелі із зони завантаження у робочу зону, місток 17 по-

винен бути відкинутий. Панель подають краном і встановлюють на середину траверси 12 на шар розчину товщиною 10... 15мм. Нижні кромки панелі закріплюють затискачами 24, а верхню. – повзунами 25 або 26. Другу верхню кромку треба закріпити затискачем 19, який знаходиться на балці 18, через що балку необхідно перемістити і закріпити у вертикальному положенні затискачем 23, який знаходиться на кронштейні 28 (залежно від типу і розміру плити). Пливу звільняють від розчалок крана.

Траверсу 12 з закріпленою на ній панеллю переміщують в робочу зону. Місток 17 встановлюють у горизонтальному робочому положенні і закріплюють болтами.

У випадку зміни типорозміру наступної панелі необхідно понизити балку 18 (або зняти кронштейн 27).

Завдяки механізованим регульовальним приводам і зміні віддалі між навантажувальними інденторами-траверсами можна випробувати стінові панелі різних типорозмірів з меншими затратами праці.

Крім того, забезпечивши стенд контролюпо-регульованим механізмом коректування перекосів і пристроєм виміру відхилень від нульової площини, можна підвищити точність і якість випробувань.

На основі 1 закріплюють напрямну 2, механізм переміщення 3, рами 7, стояки 6.

Механізм 3 подає із зони завантаження в зону випробування нижню поздовжню траверсу 12 разом з закріпленою на ній панеллю, а після завершення випробувань – панель на траверсі в зону завантаження.

Стояки 6 (26 штук) закріплюють до основи 1 і напрямної 2, вони призначені для розміщення на них опорних валків 21, якими рухається траверса 12.

Рами 7 закріплюють до основи 1 і на них розташовують колони 8. Колони 8 призначені для утворення жорсткої об'ємної конструкції, вони попарно з'єднані між собою розпорками 20 і на них розташовуються площадки 16, мостики 17, поперечні балки 9, повзуни 25 і 26 та інші деталі.

Поперечні балки 9 попарно з'єднують колони 8, які знаходяться на протилежних рамах 7 та закріплюються балкою 10. На поздовжній балці 10 встановлюють поздовжню траверсу 11 і верхні поперечні траверси 13. Верхня поздовжня траверса 11 передає зусилля від гідродомкратів, розташованих на ній, до випробувальної панелі.

На верхніх поперечних траверсах 13 кріплять тяги 15. Нижні поперечні траверси 14 шарнірно з'єднані з тягами 15, які передають

зусилля випробування від верхніх поперечних траверс 13 до нижніх 14. Необхідна робоча довжина тяг регулюється гайками.

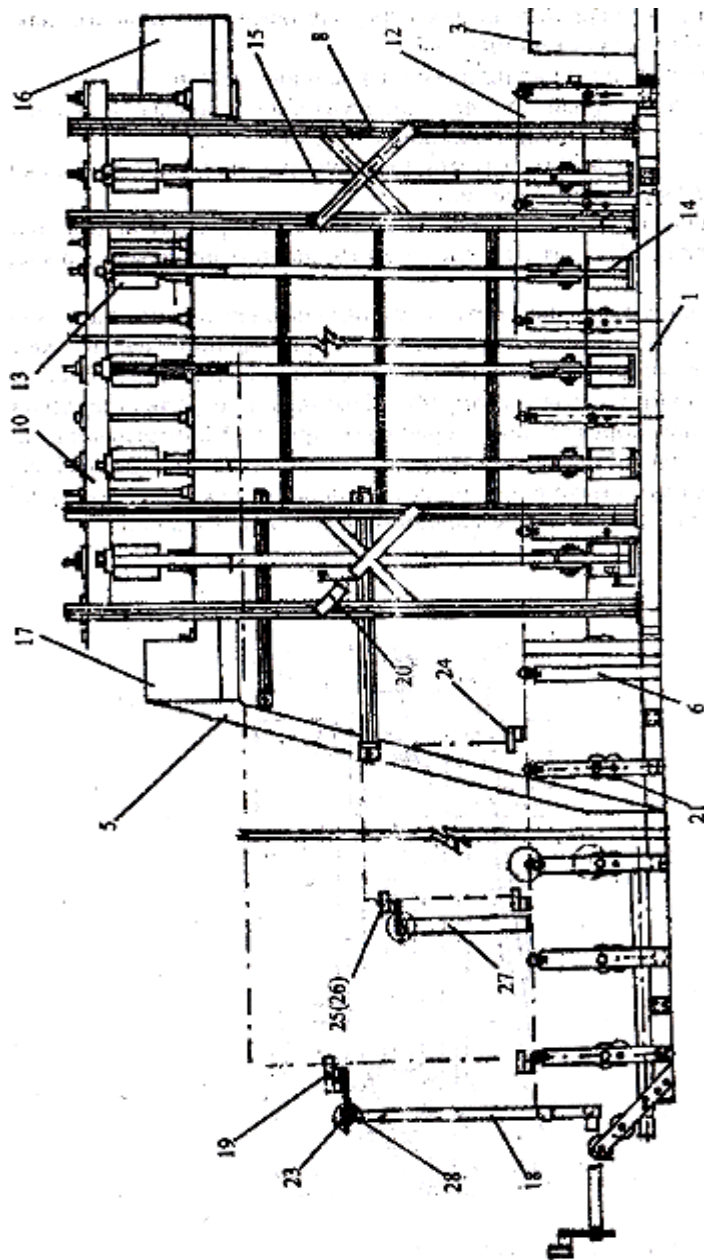


Рис. 4.2. Загальний вигляд стенда СВП-1

Мостики 17 передбачені для переходу обслуговувального персоналу з однієї площадки на іншу. Драбиною 5 персонал піднімається на площадку 16. Затискачі 24 призначені для орієнтування



випробувальної панелі на траверсі 12 та закріплення її нижньої частини. Повзуни 25 і 26 підтримують у вертикальному положенні панель на траверсі 12 у верхній її частині. На кронштейнах 27 кріпляться затискачі 23 верхньої частини панелі. На балках 18 – плити з затискачем 19, що підтримує верхню частину панелі.

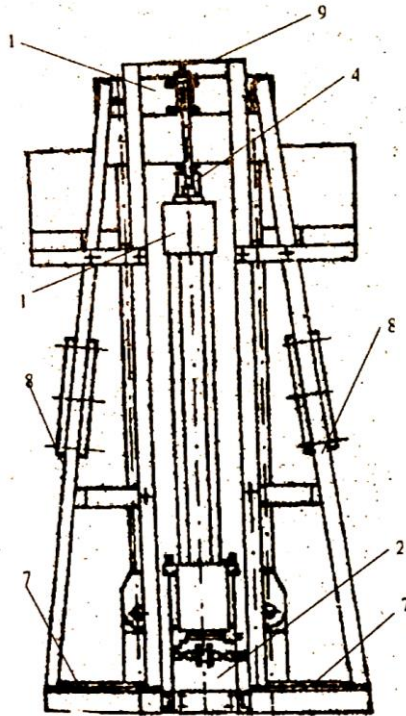


Рис. 4.3. Розріз станда СВСП -1.

Таким чином, завдяки механізованому регулювальню приводами бази випробування і зміні величини і місця прикладання навантаження є можливість випробовувати на стенді стінові панелі різних типорозмірів із зменшенням трудозатрат до 30%. Крім того, контрольно-регулювальний механізм коректування перекосів і пристрій вимірювання відхилень від нульової площини підвищують точність і якість випробування, а малогабаритність та відносно невелика вартість станда роблять його доступним і для невеликих заводів залізобетонних виробів. Використання станда дозволяє зменшити у два рази енерговитрати у зв'язку зі скороченням часу на випробування, керувати навантаженням, не доводячи його до руйнування конструкції.

#### 4.4. Стенд контролю якості довгомірних залізобетонних виробів СНК-4

Стенд передбачений для визначення якісних показників довгомірних залізобетонних виробів (колони, балки, ригелі та ін.). На рис. 4.4. показана конструкція стенда СНК-4 та схема під'єднання датчиків [2, 144].

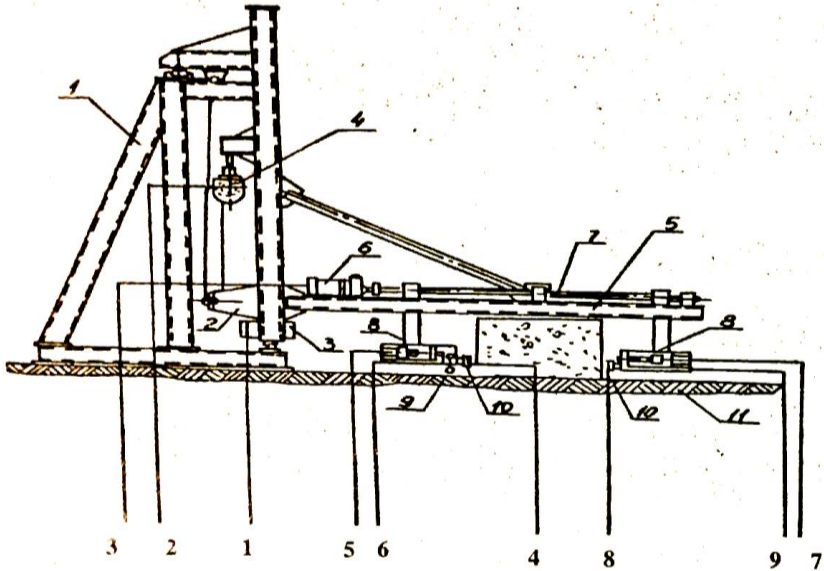


Рис. 4.4. Конструкція та схема під'єднання датчиків на стенді СНК-4.

Він складається з рами 1, вимірювального візка 2 і пульта управління, встановленого в кабіні оператора. Рама 1 виконана у вигляді зварної конструкції зі швелерів і передбачена для переміщення візка 2, який за допомогою електропривода 3 рухається вздовж виробу. До візка в горизонтальному положенні кріпиться консоль 5, яка від електропривода 4 має змогу пересуватися вгору і вниз.

На консолі 5 вимірювального візка встановлений привід 6, який через гвинтову передачу 7 забезпечує горизонтальне переміщення двох вимірювальних головок 8.

На кожній головці встановлена одна пара ультразвукових датчиків 9 для знімання міцнісних характеристик, датчик 10 вимірює захисний шар арматури, датчик 11 контролює лінійні розміри.

Візок зі вставленими на відповідній висоті головками, проходячи вздовж виробу, фіксується в потрібному місці для визначення якісних показників.

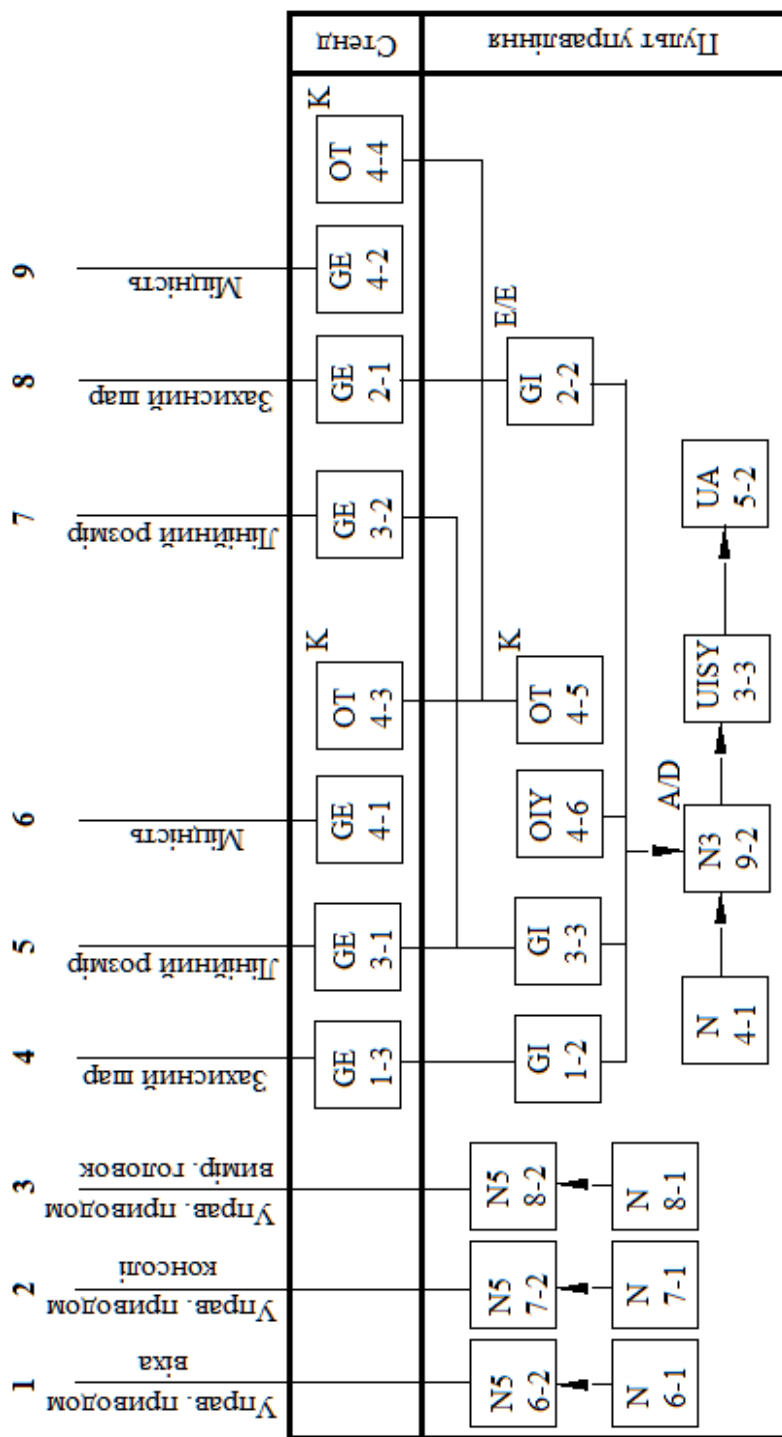


Рис. 4.5. Функціональна схема пульта станда СНК-4

Стенд з пультом управління забезпечує вимірювання і реєстрацію таких параметрів виробу:

- глибини залягання арматури;
- ширини виробу;
- міцності бетону.

Для вимірювання глибини залягання арматури використовують два прилади ИЗС-10Н, перетворювачі 1-1 і 2-1, які знаходяться на стенді, а також блоки 1-2 і 2-2 – на пульті управління.

Ширину виробу контролюють датчі 3-1 і 3-2, для чого використані перетворювачі вимірювання лінійних переміщень типу ПИЛП 1-А2. Датчі підключають до пристрою цифрової індикації 3-3 типу Ф5147.

Для визначення міцності бетону використовують пристрої поверхневого прозвучування 4-1 і 4-2, попередні підсилювачі 4-3 і 4-4, підсилювач з автоматичним регулюванням (АРП) 4-5 і прилад ультразвукового контролю бетону 4-6 типу УК-10ПМС.

На пульті розміщена апаратура керування стендом:

- перемикачі 6-1, 7-1, 8-1 і магнітні пускачі 6-2, 7-2, 8-2 для керування приводами візка, консолі і вимірювальних головок відповідно;
- 9-1 – ключ вибору контролюючого параметра;
- 9-2 – схема комутації ліній зв'язку і узгодження сигналів за рівнями.

Для приймання інформації з вимірювальних приладів і керування використовують комп'ютер.

Функціональна схема стенда та пульта керування показана на *рис. 4.5*.

#### **4.5. Стенд контролю якості плит перекриття СНК-3**

Стенд використовують для визначення якісних показників залізобетонних плит перекриття розміром 6х1.5м [2, 144].

Загальний його вид показано на *рис. 4.6*.

Стенд складається з вимірювальних стійок 1, привідного візка 2 і пульта управління в операторській кабіні. Стійки виконані у вигляді рам і встановлюються з двох боків контролюваного виробу. На кожній з них розміщена одна пара ультразвукових датчів 3 для зняття характеристик міцності бетону, датчів 4 – для виміру ширини і 5 – для виміру товщини виробу, який має можливість пересуватися від середини до краю виробу.

На візок 3 встановлюють контрольований виріб 6 і транспор-

тують його між стійками 3. Давач 7 на візку визначає глибину залягання арматури і рухається поперек плити, як і давач 8 визначення маси. Візок фіксується в потрібному місці.

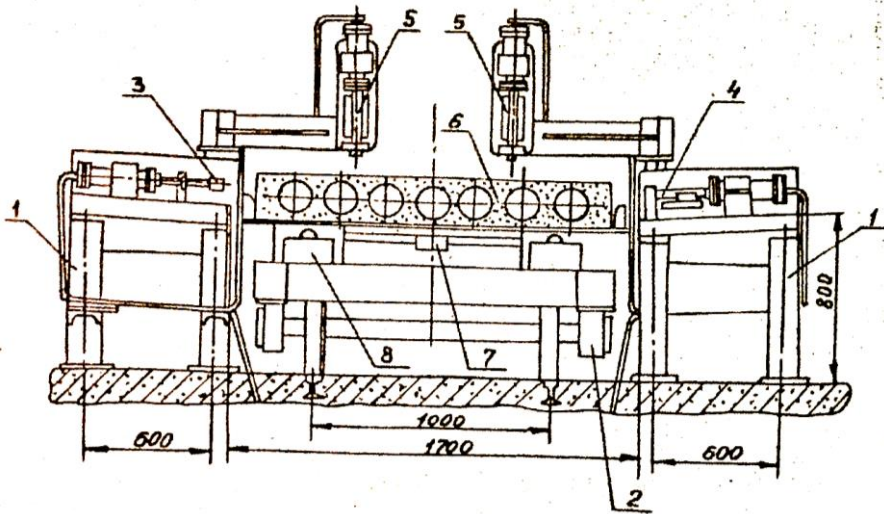


Рис. 4.6. Загальний вигляд станда СНК-3.

Схема розташування давачів (рис. 4.7) та функціональна схема пульту керування станда (рис. 4.8) забезпечують вимірювання і реєстрацію таких параметрів:

- міцності бетону;
- глибини залягання арматури;
- геометричних розмірів;
- маси виробу.

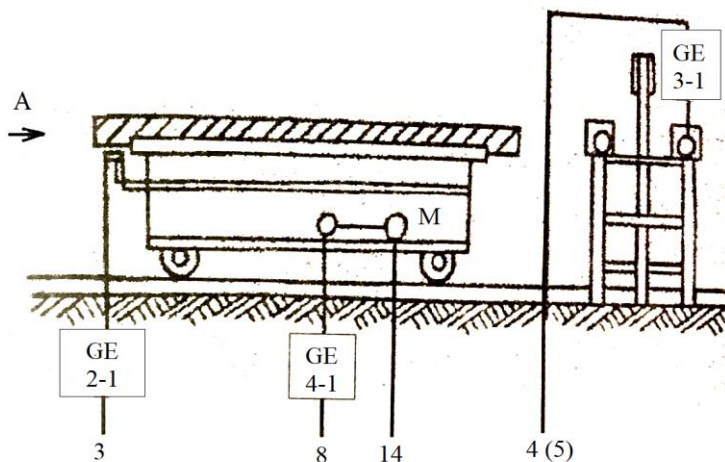
Для вимірювання міцності бетону застосовують ультразвукові давані 1-16, 1-2, кожний з яких складається з випромінювального і приймального п'єзоелектричних перетворювачів.

Для визначення глибини залягання арматури використовують перетворювач 2-1 приладу ИЗС-10Н. Ширина і висота виробу контролюється давачами 3-3 – 3-4 типу ПИЛП1-А2.

Довжину виробу вимірюють дискретним фотоелектронним давачем переміщень типу РФ 8200, який складається з освітлювача 4-2, світло-приймача 4-3 і блока живлення 4-4.

Масу встановлюють магнітопружними перетворювачами 5-1 – 5-4 типу МУП-2ТС.

Для підключення давачів до приладів використовують блоки комутації 1-3, 2-3, 3-5, 5-5, основним елементом яких є герконові реле РПГ-8.



Вид А

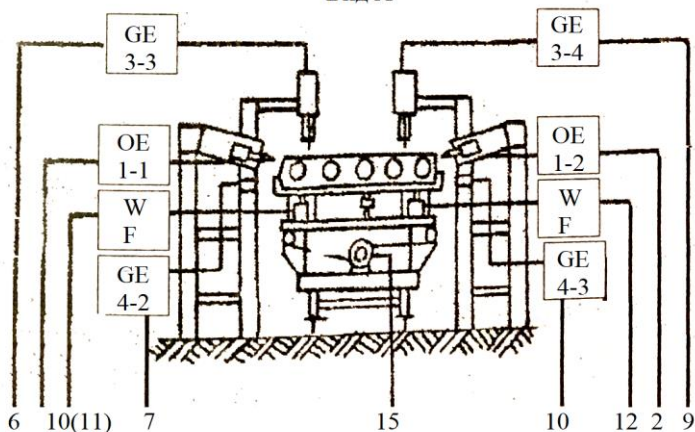


Рис.4.7. Схема підєднання давачів станда СНК-3.

Електродвигун МІ забезпечує переміщення візка з виробом, а електродвигун давача 2М2-17. В станді використовують попередній підсилювач сигналу ультразвукових давачів 1-4 типу УПС-1.

На пульті розміщені апаратура керування пристроями станда і такі прилади:

- міцність бетону вимірюють підсилювачем з автоматичним регулюванням 1-5 типу ПП-1 та приладом ультразвукового контролю 1-5 типу УК-10ПМС;

- глибину залягання арматури - приладом ИЗС-10Н, електронний блок якого 2-2 встановлений на пульті і перетворює сигнали;

- геометричні розміри виробу - приладом цифрової індикації 3-6 типу Ф5147;

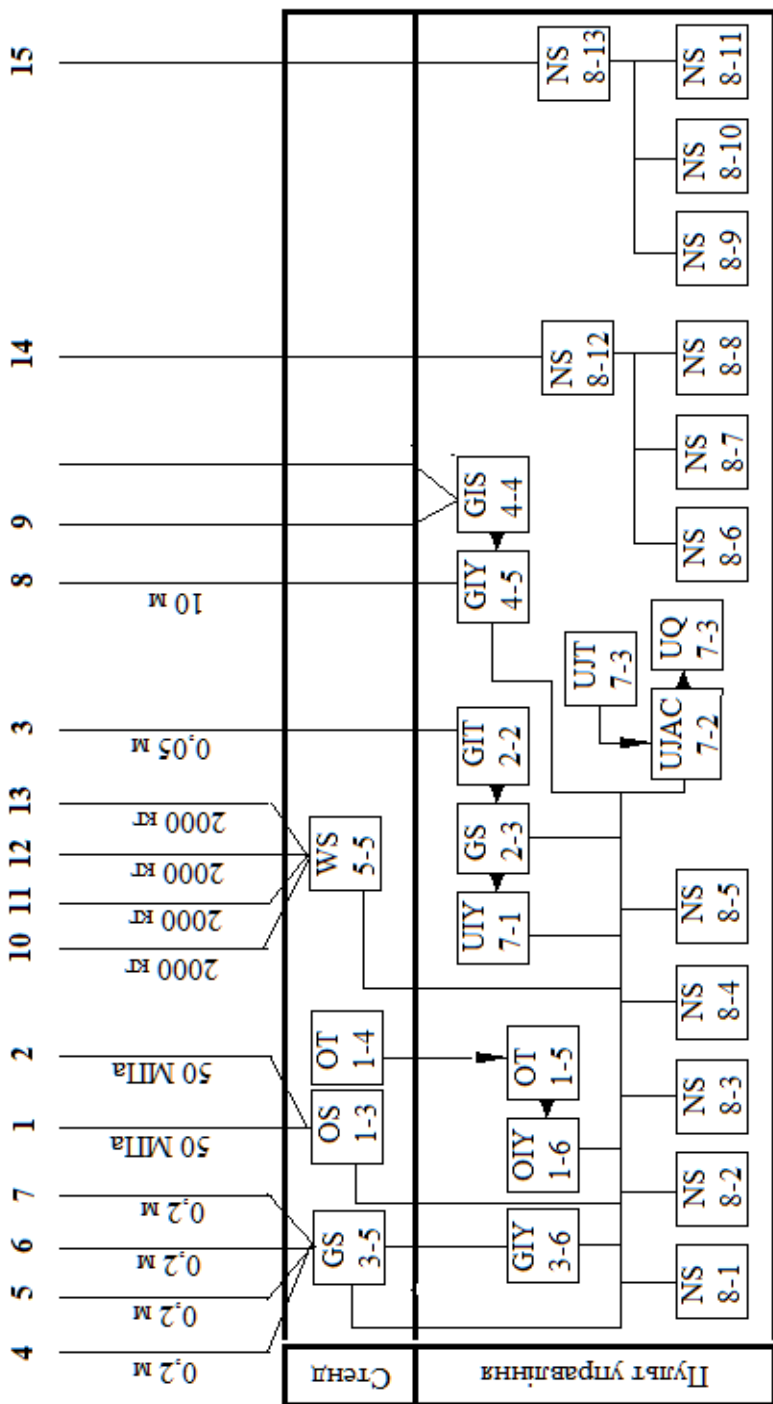


Рис. 4.8. Функціональна схема пульта управління стенда СНК-3

- довжину – електронно-лічильним частотоміром 4-5 типу Ф5035;
- глибину залягання арматури і масу виробу реєструють комбінованим цифровим приладом 7-1 типу Щ302;
- схема керування й узгодження 7-2 призначена для керування механізмами стенда, комутації й узгодження цифрових вихідних сигналів вимірювальних приладів з калькулятором і реєструвальним обладнанням;
- програмувальний калькулятор 7-3 типу “Електроніка МК-64” приймає цифрову інформацію з приладів, здійснює необхідні обчислення і вивід результатів па реєструвальне обладнання;
- електронно-друкарська машинка 7-4 типу ЕУМ-23Д фіксує результати вимірювань на паперовій стрічці;
- перемикачі 9-1 – 8-5 призначені для вибору контрольованого параметра і підключення відповідних давачів до вимірювальної схеми;
- кнопками 8-6 – 8-8 керують приводом візка;
- кнопками 8-9 – 8-11 - приводом давача 2-1;
- магнітним пускачем 8-12 – електродвигуном М1;
- магнітним пускачем 8-19 – електродвигуном М2.

#### **4.6. Стенд контролю якості внутрішніх стінових панелей СНК-1**

Стенд визначає якісні показники внутрішніх стінових панелей конвеєрної технології і встановлюється в технологічній лінії оздоблення [2, 144, 208].

Загальний його вигляд показано на *рис. 4.9*.

Вимірювальний блок стенда 1 встановлюють над привідною секцією 2 лінії оздоблення стінових панелей.

Вимірювальний блок включає дві траверси 3 з укріпленими на кожній з них шістьох пар ультразвукових давачів 6 для знімання характеристик міцності бетону і одного давача температури 4, траверсу 9 з трьома давачами 5 вимірювання захисного шару арматури, семи давачів 7 для вимірювання товщини і висоти виробу та давача 11 для визначення довжини панелі.

Траверса 3 з ультразвуковими давачами 6 за допомогою пневмоциліндра 10 може притискатись до виробу як одночасно, так і окремо, що дозволяє виконувати наскрізне і поверхневе прозвучування.

Траверса 9 з давачами 5 встановлюється з постійною щілиною 5... 10мм між головкою давача і виробом, що дозволяє знімати покази на трьох рівнях по висоті панелі.



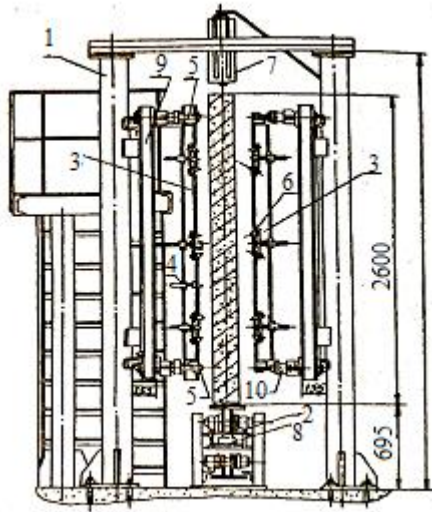


Рис.4.9. Загальний вигляд станда СНК-1.

Давачі 7 розташовують з двох боків виробу, по три з кожного, на стійках блока і один зверху над виробом.

Для визначення маси виробу використовують магнітопружні давачі 8 під опорами роликoprивідної секції 2.

За допомогою конвеєра виріб просувається через вимірювальний блок, фіксується в потрібному місці для визначення якісних показників.

Стенд забезпечує вимірювання і реєстрацію:

- міцності бетону;
- глибину залягання арматури;
- геометричних розмірів;
- температури;
- маси.

Розташування давачів на стенді показано на рис. 4.10, а функціональна схема пульта керування станда зображена на рис. 4.11.

Для встановлення глибини залягання арматури вживають перетворювачі 2-1 – 2-3 приладів ИЗС-10Н. Товщину і висоту виробу контролюють давачі 3-1 – 3-7 типу ПИЛП1-2А.

Довжину вимірюють дискретним фотоелектрошійм давачем переміщень 4-1 типу ПДФ-3, який встановлений на приводі конвеєра, реле приймача 4-3 і блока живлення 4-4.

Температуру виробу контролюють за допомогою термоелектричного перетворювача 5-1.

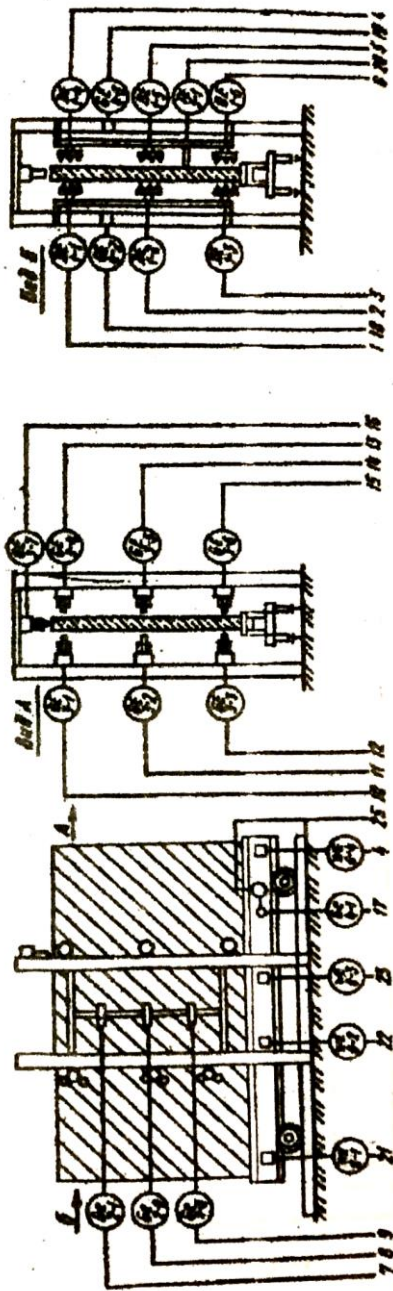


Рис.4.10. Схема під'єднаний давачів стенда СНК-1.

Масу визначають магнітопружними перетворювачами 6-1 – 6-4 тину МУП-2ТС.

Для підключення давачів до вимірювальних приладів застосовують блоки комутації 1-7, 2-6, 2-8, 3-9, 5-2, 6-5, основним елементом яких є герконові реле типу РПГ-8.

Електродвигун М забезпечує рух конвеєра.

На стенді встановлюють попередній підсилювач сигналу ультразвукових давачів 1-8 типу ППС-1.

На пульті керування розміщені така апаратура керувати пристроями стенда і контрольно-вимірювальні прилади:

- для вимірювання міцності бетону – підсилювач з автоматичним регулюванням 1-9 типу ПП-1 і прилад ультразвукового контролю 1-10 типу УК-10ПМС;

- для визначення глибини залягання арматури - три прилади ИЗС- 10Н, електронні блоки 2-4 – 2-6, які перетворюють сигнали;

- для встановлення геометричних розмірів виробу-пристрій цифрової індикації 3-10 типу Ф5147;

- довжину виробу вимірюють електронно-лічильним частотоміром 4-5 типу Ф5035;

- глибину залягання арматури, температуру і масу комбінованим цифровим приладом 7-1 типу Щ302;

- схема 7-2 призначена для керування механізмами стенда, комутації і узгодження цифрових вихідних сигналів вимірювальних пристроїв з калькулятором і реєструвальним пристроєм;

- програмований калькулятор 7-3 типу “Електроніка МК-64” приймає цифрову інформацію вимірювальних приладів, здійснює необхідні обчислення і виводить результати на реєструвальний пристрій;

- реєструвальний пристрій 7-4 – електронно-керована друкарська машинка типу ЄУМ-23Д;

- перемикачами 8-1 – 8-6 вибирають контролюючий параметр і підключають відповідні давачі до вимірювальної схеми;

- кнопками 8-7 – 8-9 керують приводом конвеєра; магнітний пускач 8-10 управляє електродвигуном М.

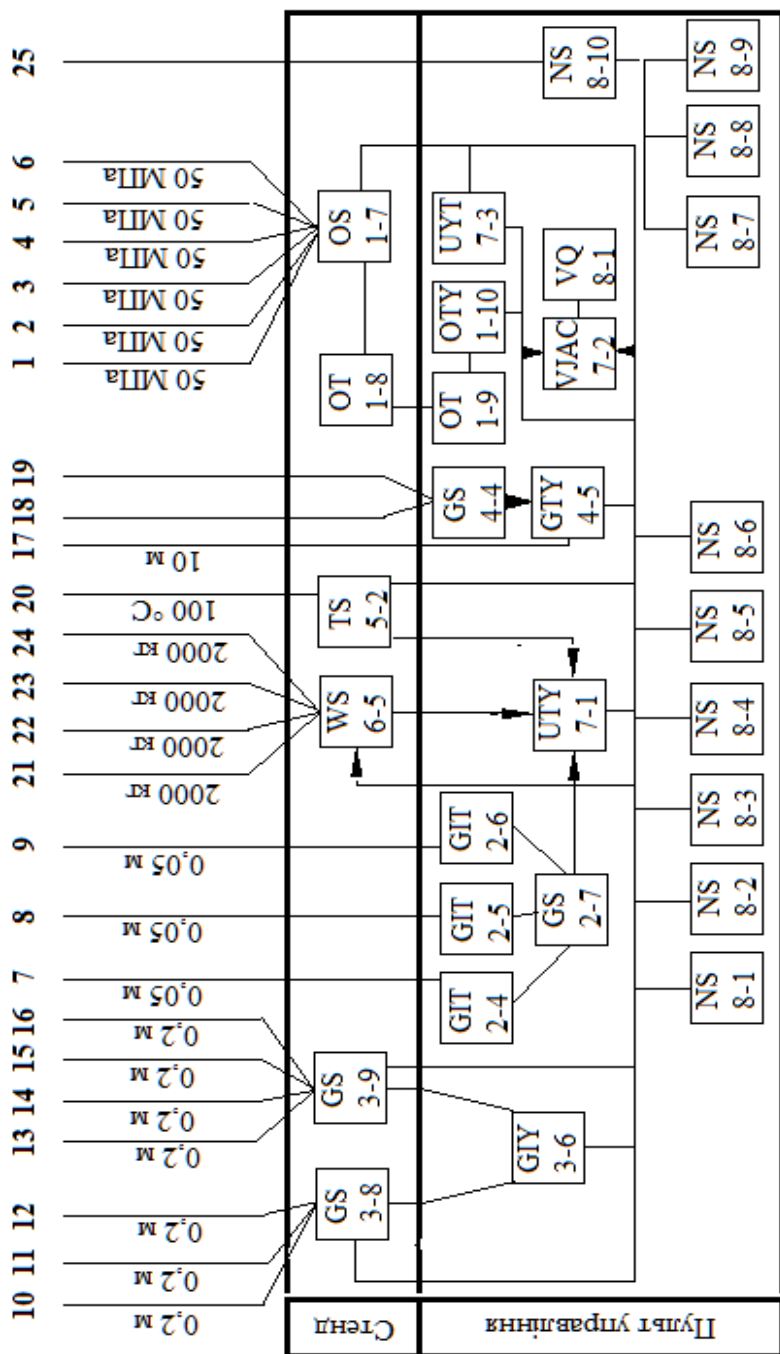


Рис. 4.11. Функціональна схема пульта управління стенда СНК-1

#### 4.7. Стенд контролю якості внутрішніх стінових панелей СНК-2

Стенд передбачений для визначення якісних показників внутрішніх стінових панелей касетної технології [110] (рис. 4.12.).

Він включає вимірювальний блок 1, стійки-підтримувачі 2, площадки обслуговування 3, привідний візок 4 та пульт управління в кабіні оператора.

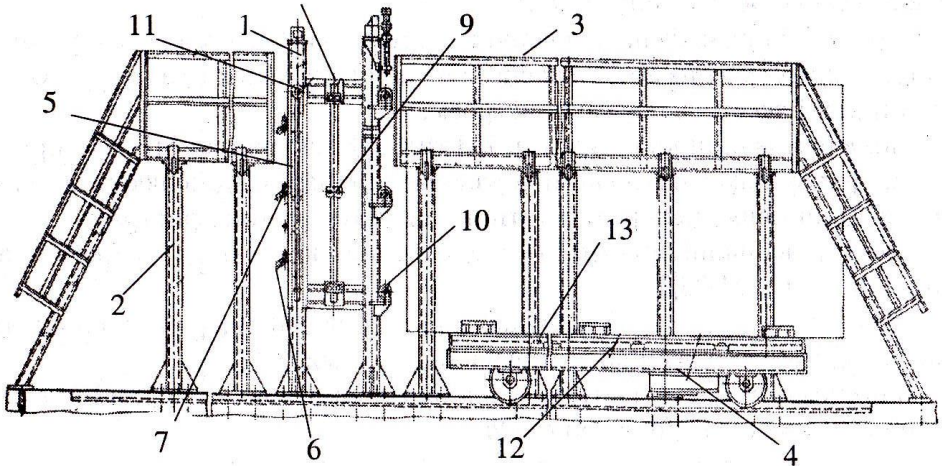


Рис.4.12.. Загальний вигляд стенда СНК-2.

Вимірювальний блок встановлюється між двома площадками обслуговування 3. Він охоплює дві траверси 5 з закріпленими на них шістьма парами ультразвукових давачів 6 для знімання характеристик міцності бетону і одним давачем температури 7, траверсу 8 з трьома давачами 9 вимірювання захисного шару арматури і сім давачів 10 для вимірювання лінійних розмірів.

Траверси 5 з ультразвуковими давачами 6 за допомогою пневмоциліндрів 11 можуть притискатись до виробу одночасно і окремо, що дозволяє викопувати наскрізне його прозвучування.

Траверса 8 з давачем 9 встановлюється з постійним зазором 5... 10 мм між головкою давача і виробом, що забезпечує зняття показів на трьох рівнях по висоті панелі.

Давачі 10 розташовані з двох боків виробу (по 3 штуки) на стінках блока і один зверху над ним.

Візок привідний 4 призначений для встановлення на ньому контрольованого виробу і транспортування його через вимірювальний блок: На візку монтується притискальна траверса 12, під якою є давач 13 визначення маси. Візок з виробом рухається через вимірювальний блок,

фіксується в потрібному місці для визначення якісних показників.

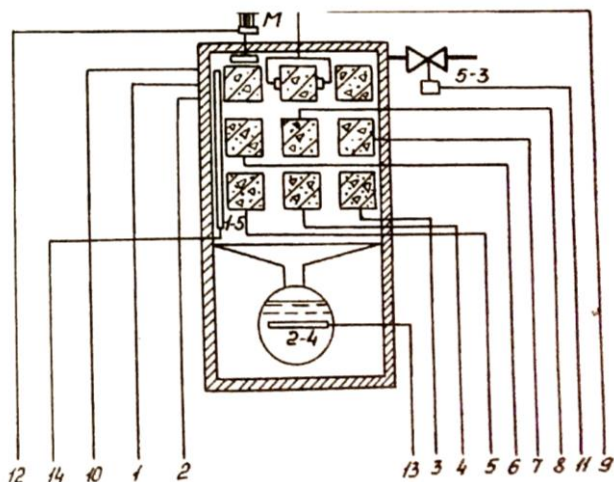
Функціональна схема стенда СНК-2 аналогічна схемі стенда СНК-1. (див. *рис.4.11*) з тією лише відмінністю, що на першому даванні вимірювання маси 6-1 – 6-4 типу МУП-2ТС і давач переміщень дискретний фотоелектричний ПДФЗ, що використовується для вимірювання довжини виробу, встановлені на візку.

#### **4.8. Установка для підбору оптимальних режимів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів**

На більшості підприємств з виготовлення бетонних та залізобетоіших виробів у заводських лабораторіях відсутні стандартні установки та інше випробувальне обладнання, що суттєво погіршує надійність виробів, гальмує впровадження передових технологій і бетонів із місцевих будівельних матеріалів.

Камери теплової обробки контрольних зразків, що застосовуються на заводах, саморобні. Вони можуть бути стаціонарні та переносні лабораторні. Недоліком таких камер є значні перепади температури і вологи в її об'ємі, відсутність управління тепловим процесом, що приводить до значних помилок у підборі складу бетону, а це впливає на деформативні і міцнісні характеристики зразків. Камери виготовляють бетонні або металеві.

На *рис.4.13.* показана конструкція та схема установки для лабораторної теплової обробки зразків [6, 143, 144].



*Рис. 4.13.* Конструкція та схема підєднання давачів установки.

Корпус установки теплоізолюваний з герметичними дверима. У внутрішній частині розташований стелаж для форм із зразками і

давач температури середовища, а на бокових стінках – теплоелектронагрівачі (ТЕНи). З внутрішньої сторони дверного отвору є запобігальна заслонка, отвір у якій закривається вихідними рамками. У верхній частині корпусу є система вимушеної циркуляції середовища, яка складається з осьового симетричного вентилятора, реверсивного електродвигуна й екрана. У нижній його частині розташована система пароутворення, яка складається з пароутворювача, з'єднаного з робочим об'ємом камери паропроводами. У пароутворювачі розміщені ТЕНи. В систему пароутворення входить рівнемір, манометр та запобіжний клапан.

#### **Технічна характеристика установки:**

максимальний тиск пари у камері пароутворювача	0,01 МПа;
об'єм пропарювальної камери	0,77 м <sup>3</sup> ;
об'єм циліндра пароутворювача	0,36 м <sup>3</sup> ;
кількість зразків, які проходять одночасно	
теплову обробку	37 шт.;
встановлена потужність	30,6 кВт;
Розміри:	
довжина	1085мм;
щиріша	1500мм;
висота	2436мм;
маса установки	680 кг.

На *рис.4.14* показана функціональна схема керування установкою. Вона передбачає програмне регулювання температури та вологості пароповітряного середовища, вимірювання температури і контроль міцності зразків, автоматичне пониження тиску в камері.

Температуру всередині камери визначає термоперетворювач опору 1-1 з вимірювальним мостом 1-2. Її значення порівнюються з наперед заданим програмним регулятором 1-3, який через контактори 1-4 включає або виключає ТЕНи у камері. Вологість у камері регулюється автоматичним психрометричним вологоміром АПВ-201, сигнал від першого перетворювача 2-2 потрапляє на другий регулювальний прилад 2-2, включаючи або відключаючи ТЕНи 2-4 з відхиленням даного параметра від призначеного.

Температура зразків, розташованих у камері, вимірюється термоперетворювачами опору 3-1 – 3-6, встановленими на зразках, і записується багатоточковим самописним мостом 3-7. Міцність зразків визначається приладом ультразвукового контролю УК-14П, сигнал п'єзоелектричних перетворювачів індексується приладом 4-2.

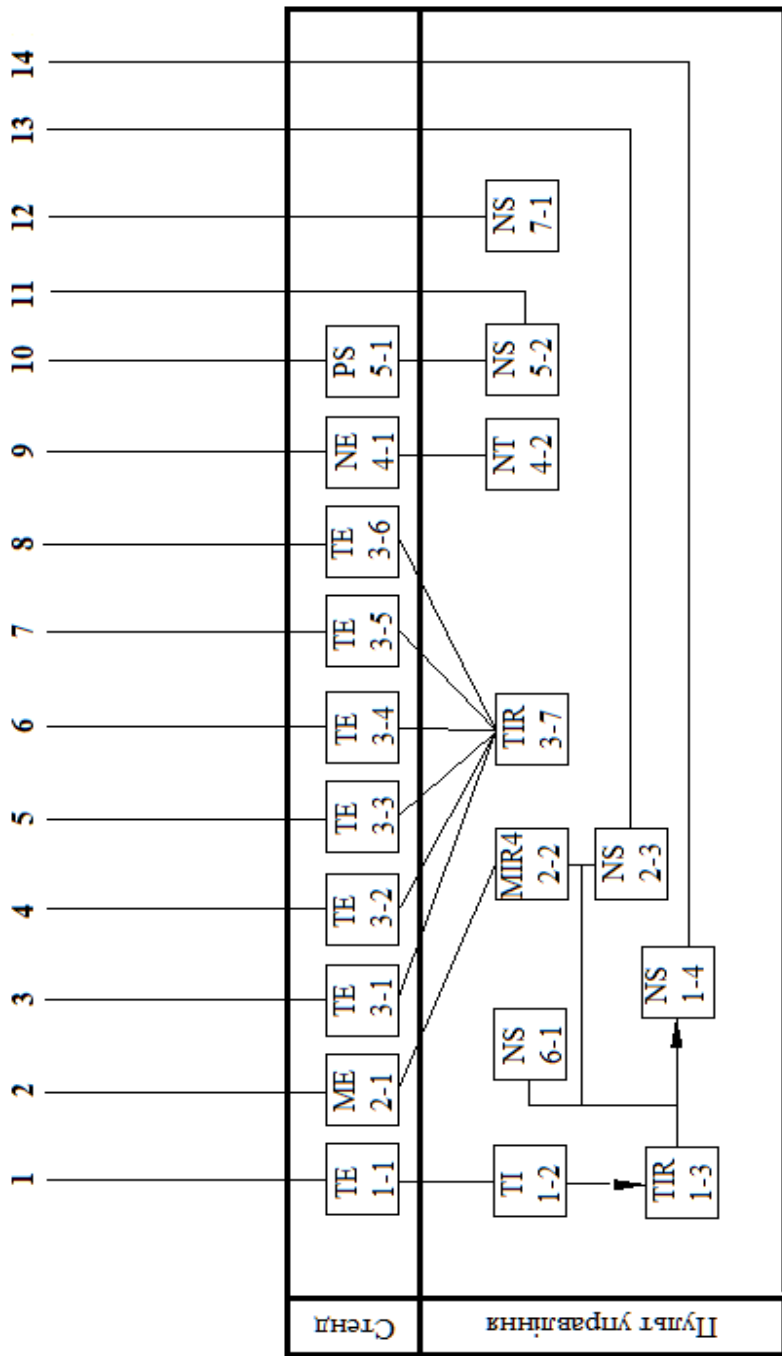


Рис. 4.14. Функціональна схема пульта установки для підбору оптимальних режимів теплової обробки

Тиск у камері встановлюється електроконтактним манометром 5-1, і при його перевищенні контактор 5-2 відкриває запобіж-



ний клапан 5-3. Перемикачем 6-1 схема переводиться па ручний режим керування. Магнітний пускач 7-1 вмикає електродвигун М (можна міняти напрям циркулювання середовища).

Процес теплової обробки зразків в установці такий. Відчиняють двері корпусу, висувають рамки, які закривають отвір запобіжної заслонки, і встановлюють на них форми зі зразками. Давачі температури і п'єзоелектричні перетворювачі приводять у контакт із зразками і засувають рамки, встановлюють форми із зразками на стелаж, закриваючи отвір запобіжною заслонкою. Далі зачиняють двері і наповнюють водою резервуар нароутворювача, слідкуючи рівноміром за її рівнем. Залежно від режиму теплової обробки на програмному регуляторі температури встановлюють програму вимірювання температури впродовж циклу теплової обробки, на цифровимірювальному вологомірі – значення необхідної вологості середовища.

Пізніше з пульта керування вмикають програму-регулятор температури та цифровимірювальний вологомір і починають цикл теплової обробки зразків. Для виключення перепадів температури та вологості у робочому об'ємі установки відповідно до програми теплової обробки періодично вмикають реверсний електродвигун системи вимушеної циркуляції середовища, перемішуючи пароповітряну суміш в об'ємі камери. Екран покращує умови циркулювання середовища. З допомогою багатоточкового моста записують температуру зразків, а приладом УК14-П визначають час розповсюдження ультразвуку в матеріалі, фіксуючи динаміку зростання міцності зразків. Залежно від динаміки за допомогою пульта керування можна міняти програму середовища. Якщо необхідно вийняти форму зі зразками, наприклад, під час механічних випробувань, у період теплової обробки відкривають двері корпусу, при цьому заслонка запобігає порушенню режиму теплової обробки. Далі витягують рамку зі встановленими на ній формами із зразками, виймають зразок, засувають рамку і закривають двері. Після цього процес теплової обробки продовжується.

Таким чином, не припиняючи теплової обробки і не порушуючи режиму середовища у робочому об'ємі, можна багаторазово відкривати камеру, виймати форми зі зразками і випробувувати їх, діставши об'єктивну картину зростання (тверднення) міцності бетону при запланованому режимі в будь-який момент часу.

Така камера забезпечує надійний і оперативний контроль теплової обробки бетону, а також визначення його найбільш оптимальних режимів і моделювання процесів, які проходять в камерах

різного типу, що дуже важливо під час впровадження у виробництво нових виробів і визначення режиму їх тверднення.

#### **4.9. Автоматизований стенд для випробування залізобетонних конструкцій**

Великі обсяги капітального будівництва зі збірного та монолітного залізобетону, розширення області застосування залізобетонних конструкцій і використання їх в умовах підвищеної температури потребують дальшого вдосконалення і розвитку методів розрахунку і випробувань з урахуванням впливу середовища. Експериментальне дослідження неможливо проводити без спеціальних установок, що відповідають сучасному рівню.

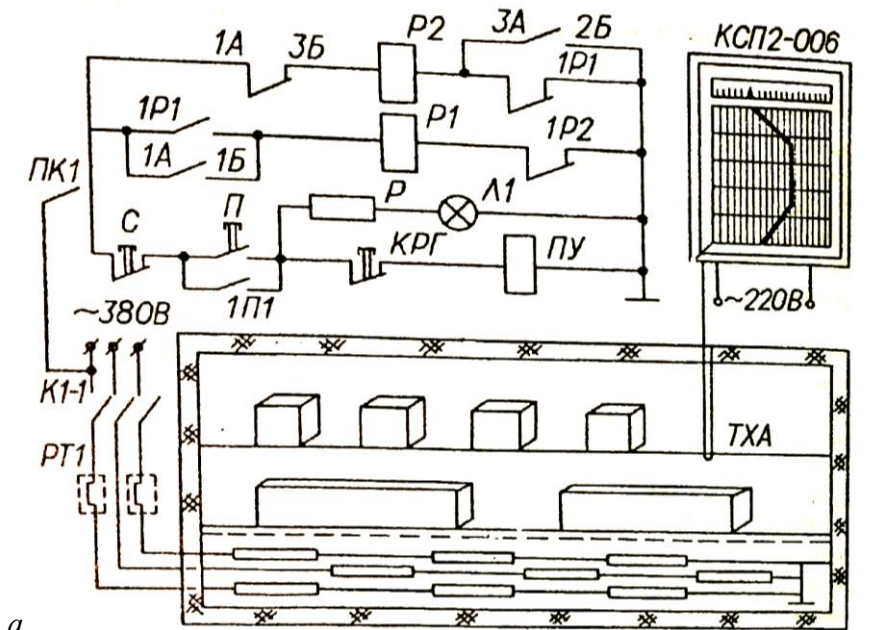
Комплексний стенд для випробування бетонних та залізобетонних зразків і конструкцій включає чотири камери, для автоматизованих систем контролю і керування температурним режимом (процесом), реєстрації експериментальних даних, набору силових пристроїв і комплексу механічних вимірювальних приладів [110, 127, 128].

Можна проводити як короткочасні, так і довготривалі експерименти (рис. 4.15).

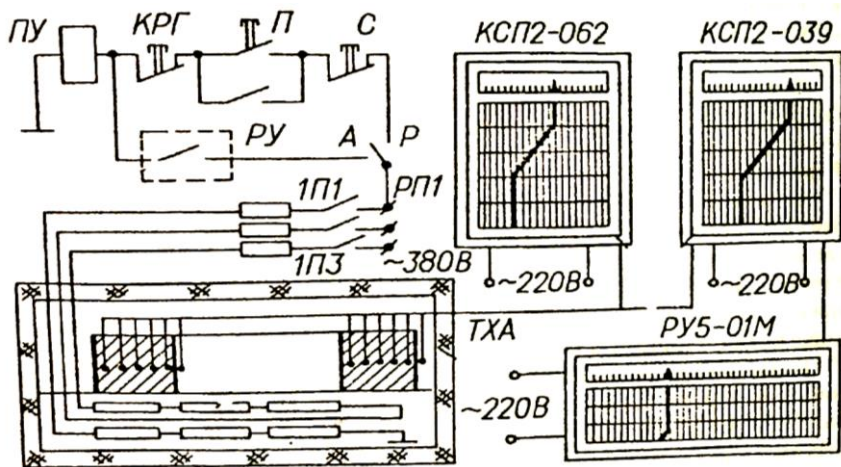
Перша камера для випробування балкових конструкцій з робочим прольотом 180 см змонтована на рамі, яка моделює згин і зсувне зусилля. Максимальне зусилля згину 250, зсуву 500кН. Друга камера для короткочасних випробувань стандартних бетонних зразків установлюється на пресі, від якого і залежить максимальне стискальне зусилля. Третя камера для випробування кільцевих залізобетонних елементів з діаметром середньої осі 150см дозволяє проводити короткочасні і довготривалі дослідження на температурно-силовий вплив. Четверта використовується для довготривалих температурних досліджень стандартних бетонних зразків.

Для температурної ізоляції застосовують високоефективні утеплювачі: мінеральну вату і спучений перліт, які дозволяють доводити температуру з внутрішньої сторони камери до 300...400°C і підтримувати її тривалий час.

Автоматизована система контролю та керування температурним процесом складається із приладів КСП-1, КСП-2, РУ-5, що мають широкі межі і велику кількість точок вимірювання температури. Загальна потужність електронагрівачів близько 20 кВт, що забезпечує швидкість нагрівання зразків від 1 до 100°C за годину і більше. Підвищення температури може бути і лінійним, і нелінійним, зокрема ступеневим.



a



b

Рис. 4.15. Електричні схеми установок:  
a – для зразків; b – для елементів конструкцій.

Температуру можливо вимірювати у 12 різних точках перерізу з точністю  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Для цього використовують термоелектричні перетворювачі ХА і ХК. Максимальна тривалість динамічного температурного режиму, що підтримується автоматично 50 год, а в ручному тривалість випробувань обмежена технічними умовами.

Автоматизована система реєстрації експериментальних даних використовує тензовимірювальний міст УТМ-5, що дозволяє зніма-

ти покази з тензодавачів деформацій і записувати на дискети. Для швидкої і надійної обробки та внесення коректив у процес випробування автоматизований стенд можна підключити до ПК. Точність реєстрації деформацій тензорезисторами  $\pm 15\%$ . Паралельно їх можна вимірювати механічними приладами.

Набір силових пристроїв включає гідродомкрати різної потужності, насосні станції, систему траверс й інші пристосування.

Стенд дозволяє суттєво підвищити надійність випробувань, скоротити їх термін, зменшити трудові й енергетичні витрати до 30...50%.

#### 4.10. Нестандартне обладнання

**Силова плита.** Прикласти зусилля до випробовуваної конструкції можна не тільки у пресі або випробувальній машині. Залізобетонні конструкції і їх елементи досліджують на спеціально обладнаних стендах [80, 81, 127, 128], коли розміри конструкцій і необхідні зусилля перевищують можливості пресового обладнання. Найбільш поширені спеціальні стенди для випробування у вертикальному (робочому) положенні балок, ферм, стінових панелей, рамних і аркових конструкцій тощо, їх можна змонтувати на фундаменті або силовій плиті.

Силова плита являє собою залізобетонний масив товщиною 1000...1500 мм. Вона є опорою для конструкції: в ній закріплюють стійки і підкоси домкратної установки й анкерують тяги, які утворюють з силовою плитою і верхньою траверсою замкнутий контур, необхідний для виникнення навантаження.

Силова плита (рис.4.16) армована у поздовжньому і поперечному напрямках. Для забезпечення анкерування вона має горизонтальні бороздки (анкерні щілини), утворені сталевими зварними балками або фермами. Віддаль між анкерними щілинами 1000 мм. Верхні пояси ферм складаються із двох швелерів №20, які знаходяться один від одного на віддалі 80 мм. Ця віддаль зумовлює ширину анкерної щілини у верхній частині. Під низом швелерів анкерна щілина розширюється на величину полицок швелера.

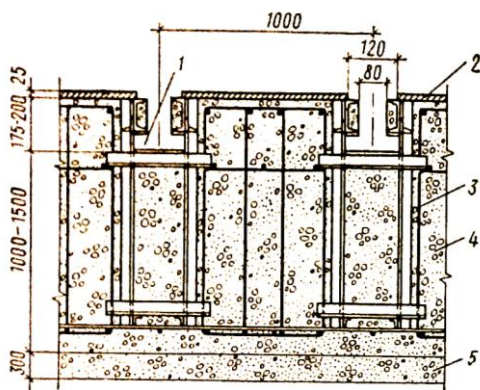
У плиті зроблені парні металеві ферми; між швелерами верхніх поясів цих ферм і ними залишається незаповнений бетоном проміжок, у який вводять і закріплюють анкери. Щоб посилити верхній пояс і не допустити утворення вм'ятин полицок під анкерами, між полицками швелерів вварюють ребра жорсткості з кроком 200 мм і бетонують внутрішні порожнини (полості) швелерів бетоном С30. Щоб уникнути засмічення анкерних щілин силової

плити, їх закривають смугами із металевої сталі товщиною 10 мм. Перед монтажем конструкцій смуги забирають із тих ділянок, де викопують монтаж. На *рис.4.17* подано схему розташування силової плити і допоміжного стенового обладнання до неї у спеціальному залі, де виконується монтаж конструкцій, збір стенових установок і випробування конструкцій.

Сили до конструкції можна прикласти вертикально і горизонтально. Відповідно стендові випробування установки поділяють на два види – з вертикальним і горизонтальним передаванням навантаження.

Конструкції, як правило, випробовують у робочому (частіше вертикальному) положенні, тобто у тому, в якому вони працюють у будівлі або споруді. Стенова установка з вертикальним передаванням навантаження (*рис.4.18*) призначена для випробувань різних будівельних конструкцій на силівій плиті. Залежно від габаритів конструкції, а також характеру експериментів установка монтується на такій плиті із окремих вузлів і деталей, що дозволяє випробувати конструкції на стиск, поперечний і поздовжній згини, зсув.

Домкратна установка (*рис.4.19*) складається із домкратної траверси, двох нижніх траверс з чотирма анкерними болтами для кріплення кожна, двох тяг, якими рухається домкратна траверса, розчалок і деталей для кріплення. Установка розрахована для випробувань при допустимих навантаженнях на металеві тяги і домкратну траверсу 200 Тс (2 МН).



*Рис.4.16.* Конструкція силової плити:

1 – анкерна щілина; 2 – цементна підлога силової плити; 3 – прокатна кутова рівнобока сталь 120x120x12 мм; 4 – бетон С20; 5 – гравійно-піщана підстилка.

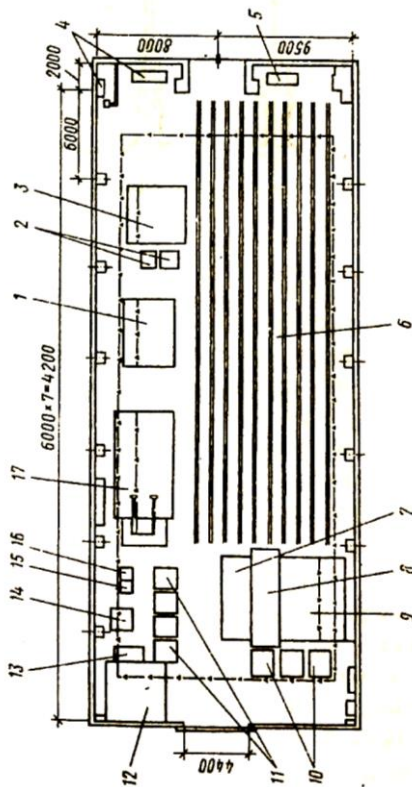


Рис. 4.17. Схема розташування обладнання у стендовому залі:

1 – стенд для випробування плит перекриття; 2 – установка із зусиллям 800 МН; 3 – установка із зусиллям 20 МН; 4 – верстак; 5 – токарний станок; 6 – силова плита для розташування збірних розбірних стендів для випробування стінових панелей, панелей перекриття, багатопрольотних ригелів, рамних конструкцій і ін.; 7 – стелаж для дослідних конструкцій; 8 – робоча площа для пристосувань до стендів; 9 – стелаж для пристосувань до стендів; 10 – контейнери для штучних тарувальних вантажів; 11 – контейнер для піску і щебеню; 12 – камера теплової обробки; 13 – контейнер для цементу; 14 – контейнер для керамзиту; 15 – сушильна шафа; 16 – вага; 17 – бетонозмішувальний вузол з зоною розташування дослідних зразків.

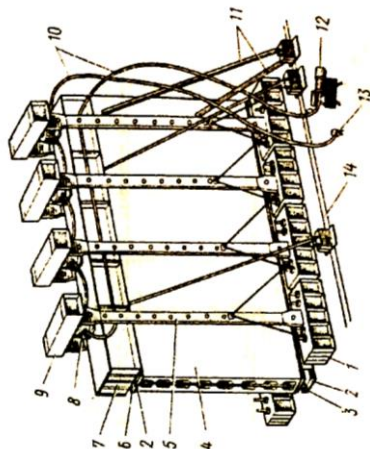


Рис. 4.18. Схема установки для випробування з вертикального передачу зусилля на стінові панелі:

1 – нижня траверса; 2 – стрічкова сталь товщиною 40 мм; 3 – нижній опорний каток; 4 – конструкція яка випробується; 5 – тяги; 6 – верхній опорний каток; 7 – роздільна траверса; 8 – домкрат ДГ-200; 9 – домкратні траверси; 10 – шланги високого тиску; 11 – бокові зв'язки; 12 – насосна станція; 13 – манометр; 14 – щільні силової плити.

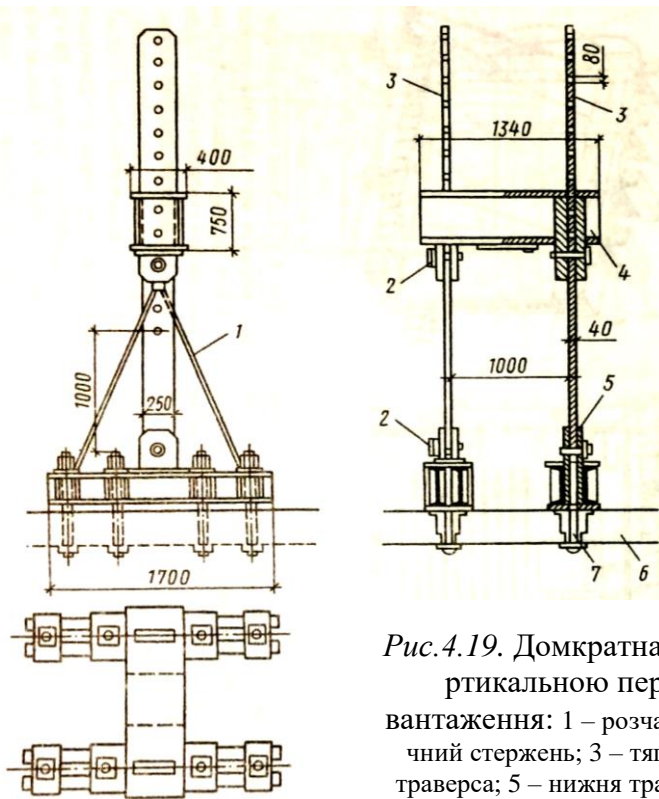


Рис. 4.19. Домкратна установка з вертикальною передачею навантаження: 1 – розчалки; 2 – циліндричний стержень; 3 – тяги; 4 – домкратна траверса; 5 – нижня траверса; 6 – щілина силової плити; 7 – болти для кріплення.

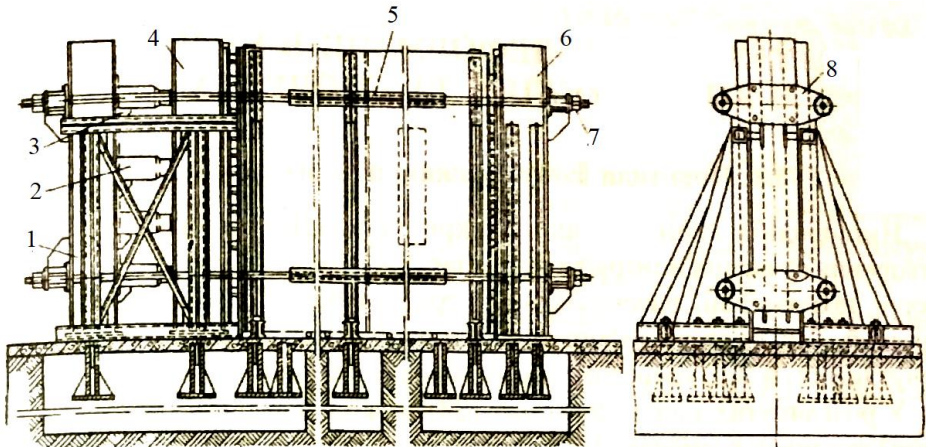


Рис. 4.20. Домкратна установка для горизонтальної передачі навантаження: 1, 4 – вертикальні траверси; 2 – гідравлічні домкрати ДГ-100; 3 – тримачі домкратів; 5 – тяги; 6 – опора; 7 – болти з гайками; 8 – горизонтальні траверси.

Монтаж установки та закріплення необхідних пристосувань виконують в наступному порядку. Над пазами силової плити ставлять нижні траверси і закріплюють кожну із них чотирма анкерними болтами з шайбами. У запліччя нижніх траверс встановлюють тяги, які кріплять циліндричними стержнями-пальцями. Далі перевіряють точність установки траверс тягами, встановлюють опорні пристрої і на них монтують конструкцію, яку випробовують. Після цього монтують верхню опору з розподільчою траверсою, на тяги надягають домкратні траверси і закріплюють їх циліндричними стержнями па такій висоті, щоб можна було розташувати гідравлічні домкрати між домкратною і розподільчою траверсами. Після закінчення монтажу перевіряють правильність і підключають домкрати до насосної станції.

Стенову установку для передачі горизонтального навантаження (рис.4.20) монтують на силіній плиті. Між вертикальними траверсами встановлюють гідравлічні домкрати, які лежать на тримачах. Конструкцію розміщують між траверсами і опорою на катках (валиках) зі сталіних стержнів. Вертикальні траверси й опора скріплені чотирма тягами за допомогою болтів з гайками і горизонтальних траверс. Установка дозволяє випробовувати конструкції розміром по висоті на 2 поверхи і шириною до 3,6 м на центральне і позацентрально навантаження (стиснення). Максимальне зусилля в установці 400 Тс (4 МН).

#### 4.11. Висновки до розділу 4

Тривалі обстеження будівель і споруд та випробування різних видів будівельних матеріалів, натурних та напівнатурних залізобетонних конструкцій в багатьох випадках на тимчасових розбірних стендах спонукали авторів до створення і розроблення стаціонарних універсальних стендів та обладнання для досліджень будівельних матеріалів, конструкцій будівель і споруд із збірного і монолітного залізобетону на підставі аналізу яких можна зробити такі висновки:

1. Розглянуто та описано обладнання для випробувань, зокрема, випробувальні машини та преси які є основним обладнанням механічних дослідних лабораторій. Преси призначені для стискування зразків матеріалів та елементів конструкцій, які виконано з гідравлічним або механічним приводом (жорсткі). Габарити деяких будівельних конструкцій є великими, що унеможливило використання універсальних машин і пресів, тоді використовують різного



типу стенди і розбірні і стаціонарні з вертикальним та горизонтальним розташуванням конструкції. До нестандартного обладнання потрібно віднести і силову плиту, конструкцію якої у цьому розділі наведено.

2. На основі багаторічних випробувань та різних видів досліджень вивчено міцності та деформативності конструкцій на тимчасових і стаціонарних стендах, що і спонукало до розробки універсального стаціонарного стенда для випробування балкових залізобетонних конструкцій за авторським свідоцтвом № 1506330 і в [111] та стаціонарних стендів випробування стінових панелей СВСП-1 конструкція якого добре описано в працях [127, 128, 143, 144]. Тут же описано і стенди контролю якості внутрішніх стінових панелей СНК-1 і СНК-2 контролю якості плит перекриття СНК-3, контролю якості двовимірних залізобетонних виробів СНК-4.

3. Створено установку для підбору оптимальних режимів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів яку описано у цьому розділі і опубліковано у працях [ ] та автоматизований стенд для випробування залізобетонних зразків та конструкцій [ ].

4. До нестандартного обладнання потрібно віднести силову плиту, конструкцію якої представлено у цій книзі та схеми установки з вертикальною передачею зусилля на стінові панелі і наведено схему національного розташування обладнання у стендовому залі.

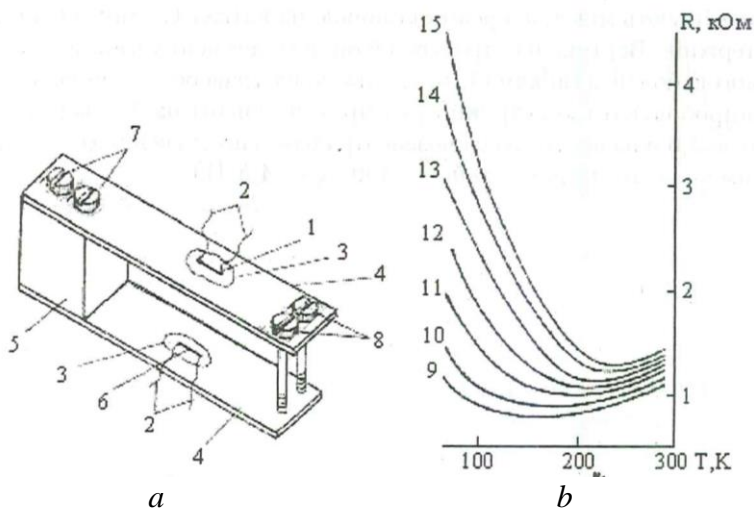
## 5. ДАВАЧІ ТИСКУ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ТА СПОРУДАХ

### 5.1. Нові типи багатofункціональних сенсорів

Ниткоподібні напівпровідникові кристали (НК) є доброю базою для створення сучасних вимірювальних засобів. Вони високочутливі, мініатюрні, технологічні, дешеві. Лідирує серед напівпровідникових матеріалів кремній. Так, сенсори деформації та температури мають коефіцієнт тензочутливості = 500, температурну чутливість = 400 Ом/К (77 К).

У розглянутих нижче сенсорах [16, 73] можна використовувати як два (три) чутливих елементи (ЧЕ), кожен з яких незалежно вимірює один з фізичних параметрів, так і один – зі змінним режимом роботи.

Сенсор температури та деформації, конструкція якого показана на *рис. 5.1, а*, а градувальна характеристика – на *рис. 5.1, б*, містить два ЧЕ – терморезистор 1 і тензорезистор 6, до яких під'єднані струмовідводи 2, прошарки клею 3, пружні елементи 4, опорну колодку 5, гвинти 7 і 8. Пружні елементи узгоджено деформуються за допомогою гвинтів 8. ЧЕ виготовлені з НК Ge n-типу, легованих Sb і Au; концентрація домішок  $10^{17} \dots 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (терморезистор) і  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  (тензорезистор).

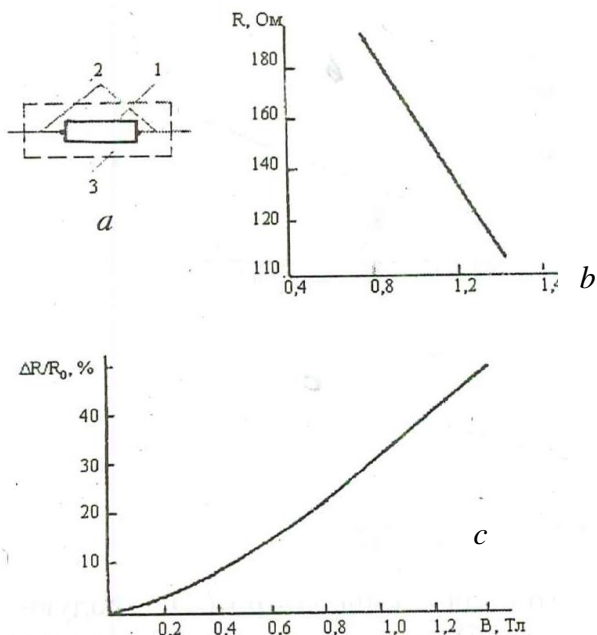


*Рис. 5.1.* Конструкція давача (*а*) та його градувальні характеристики при різних рівнях деформації (*б*).

Задаючи певний рівень деформації, отримуємо ту чи іншу термометричну характеристику  $R(T)$ . На *рис. 5.1, б* криві 9-15 відповіда-

ють таким рівням деформації:  $(0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8) \times 10^3$  в.о. Таким чином, маємо змогу керувати градувальною характеристикою терморезистора, а також змінювати положення точки мінімуму характеристики  $(253 \dots 163 \text{ K})$ . Рівень деформації контролює тензорезистор, теплочувливість якого практично не залежить від температури [4]. Низькотемпературний сенсор, виконаний з НК телуру з питомим опором  $r = 0,6 \text{ Ом см}$  при  $300 \text{ K}$  і з відношенням діаметра до довжини  $0,05 \dots 0,1$ , дозволяє вимірювати і температуру  $(1 \dots 20 \text{ K})$ , і магнітне поле.

На *рис. 5.2, а* побудовано схему конструкції сенсора *а* на *рис. 5.2, б і с*. – градувальні характеристики під час вимірювання температури і магнітного поля  $(4,2 \text{ K})$ . При вимірюванні температури сенсор розташовують вздовж ліній магнітної індукції; залежність опору від температури має вигляд  $R_o = A - B \lg T$ , де  $A$  і  $B$  - константи. У цьому випадку нехтуємо величиною поздовжнього магнітоопору ( $< 1 \%$ ), а повернувши його на  $90^\circ$ , за величиною поперечного магнітоопору визначаємо індукцію магнітного поля. Тут поперечний магнітоопір досягає  $60 \%$  в полях  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Залежність  $\Delta R/R_0 = f(B)$  близька до квадратичної [16].



*Рис. 5.2.* Схема (*а*) та градувальні характеристики давачів температури (*б*) та магнітного поля (*с*): 1 – ЧЕ; 2 – струмовідводи; 3 – підкладка.

Наступний тип сенсора служить для одночасного вимірювання як магнітного поля  $(B = 0 \dots 0,5 \text{ Тл})$ , так і температури  $(233 \dots 333 \text{ K})$ .

Він, по суті, є удосконаленим варіантом раніше розробленого, який містив перетворювач магнітного поля (елемент Холла) і терморезистор, виконані з НК [27]. Тут як сенсор магнітного поля використало магніторезистор з кристала InSb з  $r = 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а терморезистор у з твердого розчину Si-Ge, легovanого Zn з  $r \gg 0,6 \dots 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , який забезпечує лінійність термометричної характеристики  $R(T)$  (рис. 5.2, *b*). Величина магнітоопору в ньому мінімальна (0,02 %).

Схема конструкції сенсора наведена на рис. 5.3 *a*, 1 – магніторезистор, 2 – терморезистор, 3 – підкладка з Mn-Zn-фериту, 4 – струмовідводи. Феритова підкладка, концентрує магнітний потік. Чутливість сенсора до поля па підкладці (крива 1) більша від його чутливості без неї (крива 2), тут  $\Delta U$  - приріст напруги на ЧЕ за рахунок магнітного поля  $\Delta U = U_B - U_0$  при стабілізованому робочому струмі  $I_0 = 160 \text{ мА}$  [127, 128].

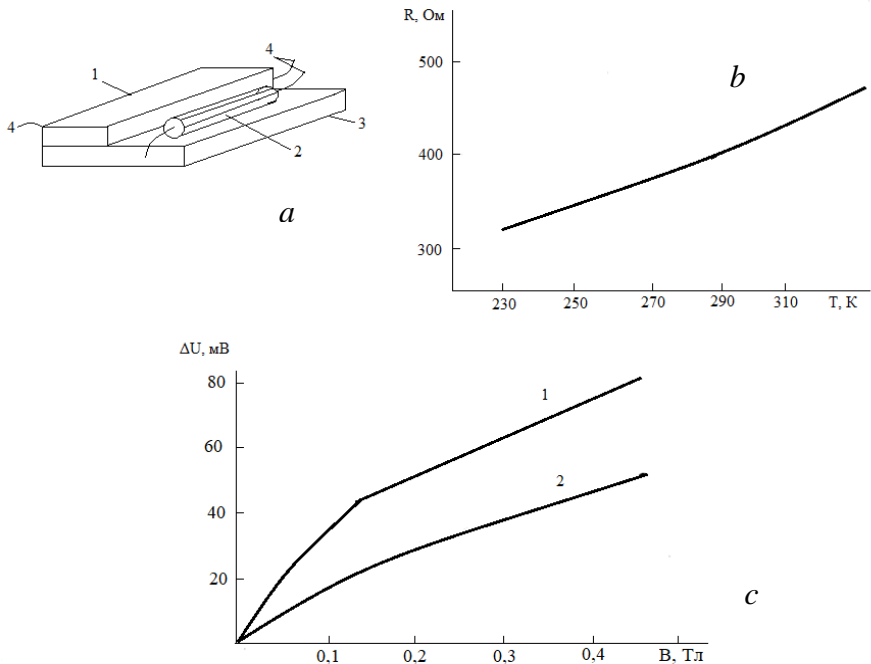


Рис. 5.3. Вимірювач магнітного поля і температури (*a*), градуювальні характеристики терморезистора (*b*) та градуювальна характеристика магніторезистора (*c*).

Розроблено одпоелементний сенсор для вимірювання температури та магнітного поля. Такі температурочутливі магнітні напівпровідники відомі. Проте в них використовують роздільно два пристрої, що ускладнює процес вимірювання [17, 127, 128].

В даному сенсорі ЧЕ 1 виготовлено з пресованого марганець-цинкового фериту  $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$  складу  $x = 0,5$  з питомим опором 500... 1000 Омсм (рис. 5.4, а), контакти 2 - з привареного луженого мідного дроту 3, закріпленого індієм. Задаючи через ЧЕ малі робочі струми ( $I_0 < 50$  мкА), використовуємо сенсор для вимірювання температури (рис. 5.4, б) при цьому похибка = 0,1 %, а задаючи-великі ( $I_0 > 5$  мА) - для вимірювання індукції магнітного поля (рис. 5.4, с). Тут залежність  $\Delta U = f(B)$  відповідає температурі 300 К гіри  $I_0 > 5$  мА, а в разі необхідності – в цю залежність вноситься відповідна температурна поправка [127, 128].

Зупинимось на багатofункціональному сенсорі для вимірювання трьох параметрів - деформації, температури і магнітного поля. Чутливим елементом є голчастий напівпровідниковий кристал твердого розчину  $Si_{1-x}Ge_x$  складу  $x = 0,05$ , легований Zn, з питомим опором 0,5 Ом см. ЧЕ 1 (рис. 5.5) складається з трьох частин, утворених чотирма точковими контактами так, що частина зі сторони більшого поперечного перерізу (2-3) використовується для вимірювання деформації, середня (3-4) – температури і частина зі сторони вістря (4-5) – магнітного поля.

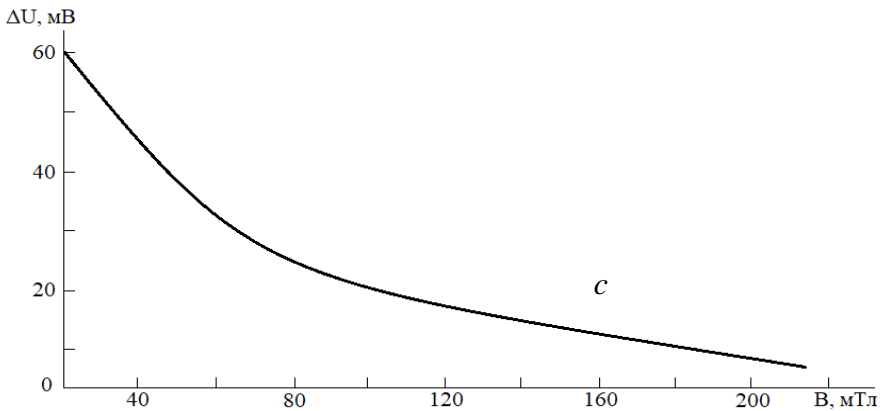
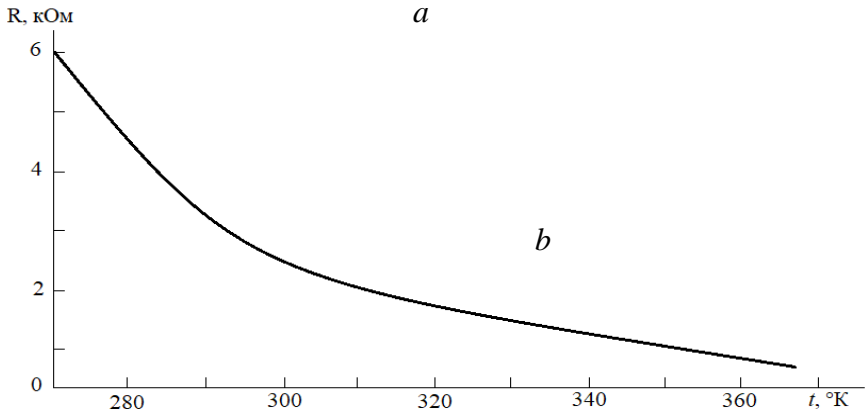
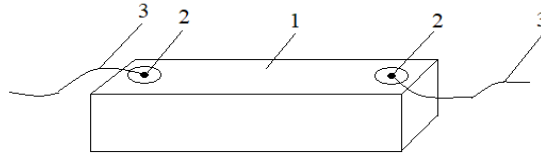
Під час роботи сенсор розташовують на пружному елементі, приклеюючи до нього частину 2-3, яка є тепзорезистором з коефіцієнтом тензочутливості  $K = \Delta R/R_0e$  більшим 100 ( $\Delta R/R_0$  – відносна зміна опору,  $e$  - відносна деформація розтягу або стиску). Терморезистор (частина 3-4) має лінійну залежність  $R(T)$  з температурним коефіцієнтом опору (ТКО) = + 0,4 %/К. Для вимірювання індукції магнітного поля використовують нелінійне S-подібну ВАХ контакту 4. Оптимальна чутливість та лінійна залежність приросту напруги  $\Delta U = f(B)$  при  $I = \text{const}$  забезпечується таким співвідношенням частин ЧЕ: 3:2:1.

Температурна зміна тензочутливості сенсора в інтервалі 293...353 К не перевищує 10 %, магнітоопір ЧЕ < 0,1 %, тому магнітне поле не впливає на покази перетворювачів деформації і температури [16, 19].

Для побудови багатofункціональних сенсорів використовують різні фізичні та конструкційно-технологічні принципи, а також способи отримання напівпровідникового матеріалу [19]. Перспективними в сенсориці вважають аморфні матеріали. Наприклад, на основі аморфних плівок телуриду германію ( $a - GeTe$ ) створені температурні сенсори [60].

Проте аморфний сплав GeTe можна отримати простіше – за допомогою лазерного випромінювання. Тоді пластину Te розташо-

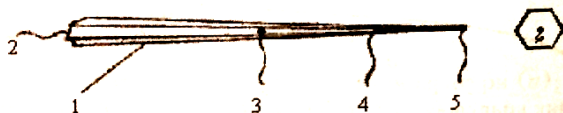
вують на підкладці n-Ge і пропускають зверху неперервне випромінювання  $\text{CO}_2$  – лазера протягом 5...15 с з густиною потужності 200...400 Вт/см<sup>2</sup>; утворений сплав відокремлюють від підкладки і наносять на нього з протилежних сторін In-контакти [29].



*Рис. 5.4.* Одноелементний сенсор для вимірювання температури і магнітного поля (*a*), градувальні характеристики давачів температури (*b*) та магнітного поля (*c*).

Схема отримання аморфного сплаву GeTe показана на *рис. 5.6, b*, де 1 – підкладка з n-Ge; 2 – пластина Te; 3 – лазерна установка ЛП-25; 4 – аморфний сплав; 5 – індієві контакти; 6 – струмовідводи.

Терморезистивні параметри отриманого сенсора:  $R_{\text{нмт}} - 100 \text{ кОм}$  ... ІМОм (300 К), ТКО = 5 %/К, температурний діапазон 123 ... 373 К. Він може вимірювати також відносну вологість повітря (20...100 %). Градувальні криві для цього випадку наведені на *рис. 5.6, b*.



*Рис. 5.5.* Багатофункціональний сенсор.

Зупинимось на способі визначення точки роси і температури. Переважно точку роси визначають, збуджуючи незагасні коливання резонатора, під час термоелектричного охолодження якого вимірюють частоту коливань резонатора і температуру. Якщо резонатор п'єзокварцевий, то гістерезис та висока частота власних коливань (5...30 МГц) ускладнюють вимірювальний процес та знижують точність.

Автори запропонували нове виконання резонатора зі струною з НК Si-Ge, жорстко закріпленою в деформованому стані на дзеркальній кремнієвій підкладці [57], що забезпечує нижчу резонансну частоту (20...50 кГц), достатньо високу температурну чутливість частоти власних коливань і, з пониженням температури внаслідок конденсації вологи на дзеркальній кремнієвій підкладці, стрибкоподібну зміну частоти коливань (так званий "зрив"), яку з високою точністю фіксують. Схема пристрою для визначення точки роси цим способом показала на *рис. 5.7*, де 1 – електромеханічний резонатор, що включає струну з НК 2, контакти зі струмовідводами 3, вузли кріплення 4, кремнієву підкладку 5, електрод збудження 6, автогенератор 7, частотомір 8, осцилограф 9, лінію зворотного зв'язку 10. Як ЧЕ 2 використовували НК Si-Ge (1 ат. % Ge) р-типу провідності з гн 0,01 Ом см, довжиною 3 мм, діаметром 25 мкм. Контакти створювали приварюванням Pt-мікродроту. Розміри полірованої кремнієвої підкладки такі: діаметр 6 мм, товщина – 0,5 мм. ЧЕ закріплюють у вузлах 4 склоцементом СЦН-52 на відстані від підкладки – 50 мкм. Для створення попередньо деформованого стану струну (або підкладку) нагрівають у в момент закріплення до температури – 373 К.

Власна резонансна частота забезпечується параметрами і геометрією кристала, а також технологією його закріплення. Охолоджуючи резонатор 1 за допомогою термоелектричного холодильника і використовуючи для реєстрації частотомір марки ЧЗ-34А і осцилограф С1-83, одержали чутливість до температури і 20 Гц/К, що дозволяло визначати точку роси з точністю > 0,05 К [59, 60, 61].

Попередньо деформований стаї ЧЕ може забезпечити як додатний, так і від'ємний температурний коефіцієнт зміни частоти власних коливань резонатора. Для вимірювання відносної вологості можна також використовувати терморезистори з НК в режимі перегріву.

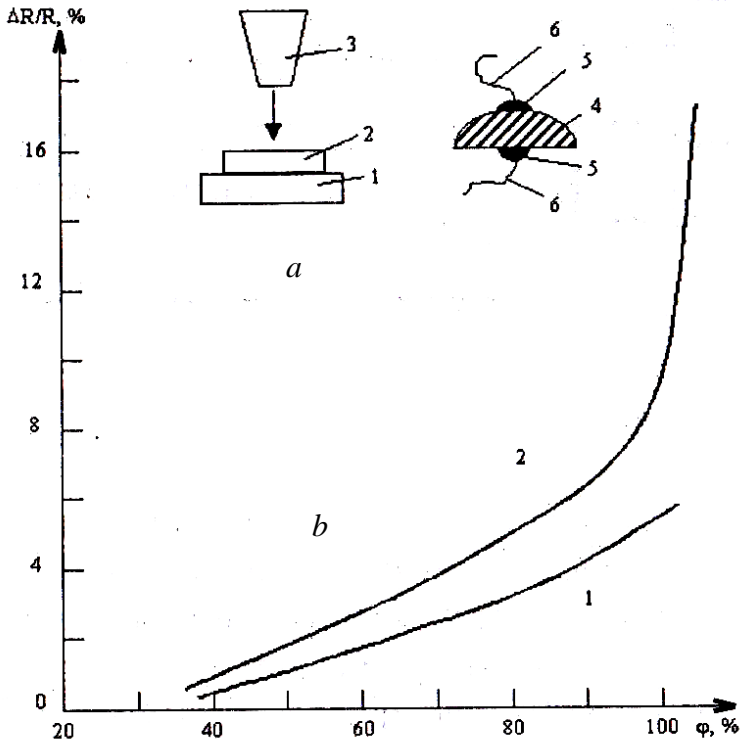


Рис. 5.6. Схема отримання аморфного сплаву (а), градувальна характеристика давана вологості (b) при 25°C (1) і 50°C (2).

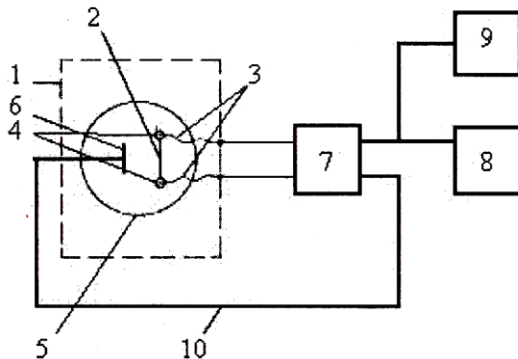


Рис. 5.7. Схема пристрою для вимірювання точки роси.



Прикладом успішного розв'язання задачі одночасного вимірювання комплексу фізичних параметрів за допомогою сенсорів з напівпровідникових НК є створення давача стану атмосфери [16, 60, 61]. Вимірювання таких параметрів, як атмосферний тиск, температура та швидкість потоку повітря, здійснюється за допомогою трьох ЧЕ, що працюють на резонансному принципі.

Застосування НК як модельних об'єктів для створення перетворювачів фізичних величин подало в працях [16, 59, 60, 61].

## **5.2. Пристрої для досліджень тензорезистивних давачів вимірювання деформацій, побудованих з ниткоподібних кристалів**

Для перетворення механічних величин у зручну для передачі та сприйняття форму використовують різні фізичні явища, яким властиві достатньо строгі закономірності. Одним із таких є тензорезистивний ефект.

Суть його полягає в зміні активного опору провідника під дією механічних напружень; у металів і сплавів активний опір міняється в основному внаслідок зміни геометричних розмірів, у напівпровідників – через зміну питомого електричного опору (рухливості носіїв заряду).

Створені тензорезистивні давачі (ТР) з напівпровідникових ниткоподібних кристалів з високими коефіцієнтами тензочутливості та малою базовою довжиною вимагають специфічного конструктивного підходу до вирішення проблем контролю їх параметрів (характеристик), які розглянуті в даній роботі [59, 60, 61].

Перетворювачем механічного сигналу є пружний елемент. Вхідна його величина – це сила або тиск, вихідна – переміщення або деформація, виражені у відносних чи абсолютних одиницях. Під деформацією розуміємо переміщення точок на поверхні пружного елемента.

Розглянемо пружні елементи, в яких вхідною величиною є сила, а вихідною – деформація: стержень, кругове кільце, мембрана постійної товщини, консольні балки рівного прямокутного перерізу та рівного опору згину. Зв'язок між цими двома величинами здійснюється відповідно з законом Гука

$$\varepsilon = S \cdot F, \quad (5.1)$$

де:  $\varepsilon$  – відносна деформація пружного елемента;  $S$  – його чутливість;  $F$  – сила, прикладена до нього.

Залежно від конструкції чутливість пружного елемента залежить від т.зв. його конструктивного коефіцієнта чутливості  $B$ . Значення  $B$  може змінюватись у певних межах для окремих видів пружних елементів.

жних елементів. Так, для суцільного стрижня ці межі від 1 до 0,3; для кільця 1,91... 1,09; для мембрани 1,31.. .0,433; для балки рівного перетину 6.. .0; для балки рівного опору – постійна і рівна 6.

Простий у виготовленні стрижень має суттєвий недолік – обмежену чутливість і в основному використовується для високих меж вимірювання.

Кругове кільце постійного перерізу має деякі переваги. Так, величина переміщення рухомої частини пружного елемента суттєво більша, ніж у стрижня. Кільцеві пружні елементи чутливіші і їх використовують для перетворення сили до 10 Н. їх недоліком є нерівномірний розподіл напружень у зоні деформації.

Чутливішими до сили є балкові пружні елементи. Вони технологічні у виготовленні, дозволяють отримувати значні переміщення, а деформації стиску і розтягу у них однакові. Недоліком таких елементів є потреба жорсткого кріплення кінця балки та фіксації точки прикладення сили; під дією сили кінець балки переміщається по дузі кола і точка прикладення сили змінює свої координати, що спричиняє додаткові похибки. Розподіл напружень у балці постійного перерізу нерівномірний. Для забезпечення рівномірного розподілу застосовують балку рівного опору.

Таким чином, розглянуті конструкції пружних елементів, що перетворюють силу в деформацію, мають функцію перетворення та чутливість, які контролюються конструктивними розмірами, модулем пружності та конструктивним коефіцієнтом чутливості. Останній визначає не тільки величину чутливості, а й її знак. Загалом величина і знак конструктивного коефіцієнта чутливості залежать від координати перерізу, характеру деформації та ступеня використання зон деформації.

Виходячи з аналізу властивостей пружних елементів, для створення конструкцій деформівних пристроїв вибрали консольну балку рівного опору згину. Зв'язок між прикладеною силою і максимальними деформаціями від поверхневих напружень визначається співвідношенням

$$\varepsilon = \frac{6l}{hs_{cm}E} F = S_{\sigma} F, \quad (5.2)$$

де:  $l$  – довжина балки;  $h$  – її товщина;  $S_{cm}$  – площа перерізу;  $E$  – модуль пружності матеріалу балки;  $F$  – прикладена сила;  $\varepsilon$  – деформація балки в місці затиснення;

$S_{\sigma} = \frac{6l}{bs_{cm}E}$  – чутливість балки рівного опору.

У такого пружного елемента напруження як верхніх, так і нижніх волокон балки не залежать від вибору перерізу, постійні по

всій довжині балки і дорівнюють напруженню в місці її затищення, тому конструктивний коефіцієнт чутливості такого пружного елемента не залежить ні від координати перерізу, ні від повноти використання зони деформації. Його величина постійна і дорівнює 6, міняється лише знак залежно від того, чи використовується деформація верхніх, чи нижніх волокон [16, 60, 61].

Для дослідження тензорезистивних датчиків із ниткоподібних кристалів розроблено ряд типів деформувальних установок (пристроїв).

Деформувальний пристрій ЛДП-1 (рис. 5.8), використовується для зняття статичних деформаційних характеристик ТР у лабораторних умовах при деформаціях і розтягу, і стиску.

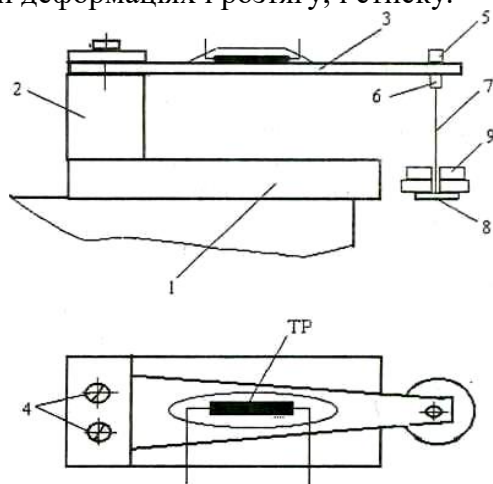


Рис. 5.8. Конструкція деформувальнього пристрою ЛДП-1:

- 1 – основа; 2 – опорна стійка; 3 – консольна балка; 4 – закріплюючі гвинти;  
5 – штифтфіксатор; 6 – підвіс; 7 – коромисло; 8 – диск-тримач;  
9 – калібрувальні диски; ТР – тензорезистор.

Він складається з масивної основи 1, до якої через опорну стійку 2 прикріплюється консольна балка 3, на якій встановлюється досліджуваний ТР. Через отвір на звуженій ділянці балки за допомогою штифта-фіксатора 5 та підвісу 6 кріпиться коромисло 7 з диском-тримачем 8, на який встановлюються калібрувальні диски 9.

Залежно від маси калібрувальних дисків  $F$  змінюється величина деформації, що задається, максимальне значення якої звичайно досягає  $\pm 10^{-3}$  в.о. Матеріалом консольної балки рівного опору є сталь марки 65Г.

Коли необхідно провести дослідження на стиск, консольна балка повертається на  $180^\circ$ , тобто ТР розташовується знизу. Аналогічний принцип роботи й такого пристрою спрощеної конструкції (рис. 5.9).

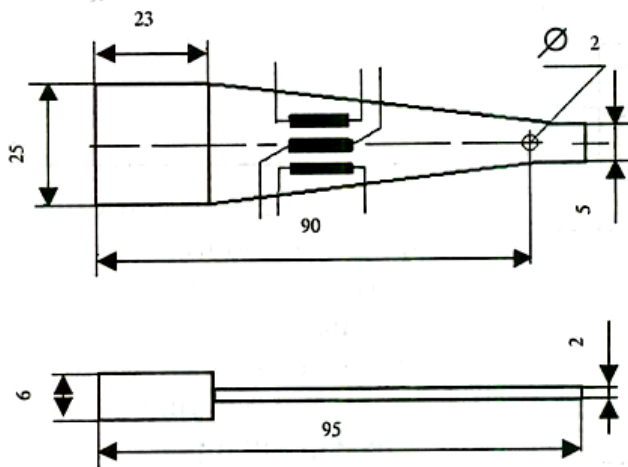


Рис. 5.9. Конструкція та розміри спрощеного деформувального пристрою.

Він може встановлюватись у звичайних, жорстко закріплених лещатах, і працювати па розтяг або стиск. Новий деформувальний пристрій ЛДП-2 (рис. 5.10) дозволяє задавати малі рівні деформації та плавно міняти навантаження.

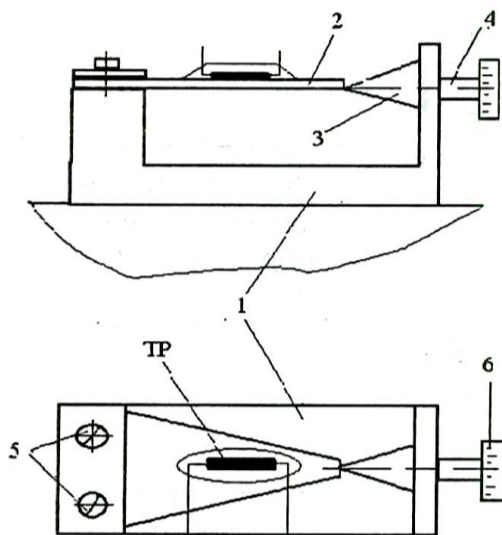


Рис. 5.10. Конструкція деформувального пристрою ЛДП-2:  
 1 – основа; 2 – консольна балка; 3 – конус; 4 – мікрометричний гвинт;  
 5 – кріпильні гвинти; 6 – лімба; ТР – тензорезистор.

Він має вигляд кронштейна з основою 1, на якій консольну балку рівного опору 2 затискають гвинтами 5. З протилежного кіп-

ця основи встановлено мікрометричний гвинт 4, до кінця якого жорстко закріплений металевий конус 3. Мікрометричний гвинт має колесо-лімб 6, на якому нанесено проградуйовану шкалу.

Залежно від вибраного виду деформації (розтяг або стиск) пристрій попередньо підготовляють, встановлюючи балку відносно конуса (рис. 5.11).

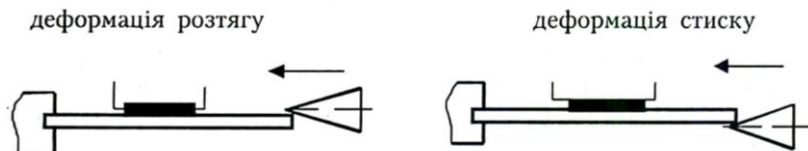


Рис. 5.11. Робота пристрою на розтяг або стиск.

Обертаючи мікрометричний гвинт, конус переміщається і своєю поверхнею відхиляє консольну балку, створюючи відповідну деформацію. Лімб-колесо можна проградувати за величиною стріли прогину кінця балки або за допомогою еталонного ТР. Можливе градування й еталонним динамометром. Кожній точці твердої конуса відповідає певне значення сили, яке фіксується динамометром, нерухомо закріпленим відносно до конуса.

Пристрій малогабаритний і дозволяє вимірювати у теплових і магнітних полях.

Дещо іншої конструкції пристрій для тарування ТР ЛТП-3 (рис. 5.12).

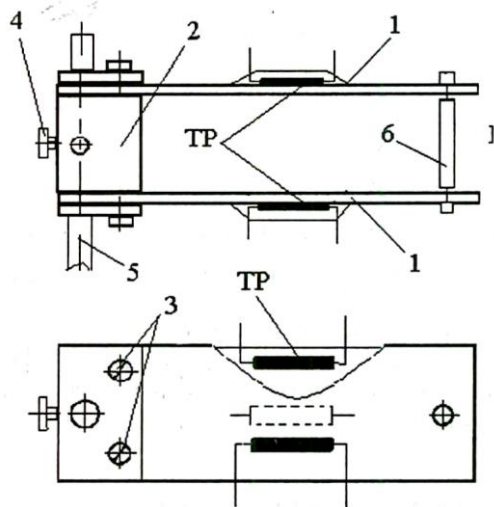


Рис. 5.12. Конструкція деформувального пристрою ЛДП-3:

- 1 – консольна балка; 2 – опорна сійка; 3 – гвинти кріпильні;
- 4 – гвинт фіксувальний; 5 – штанга; 6 – деформувальний гвинт.

Він складається з двох, однакових за характеристиками, балок рівного перерізу 1, затиспєпих па опорній стійці 2, яку можна закріплювати гвинтом 4 на штанзі 5 штатива. Балка прогинається гвинтом 6, який задає певний рівень деформації розтягу або стиску. ТР па балках повинні розташовуватися в однакових деформуєвальних зонах. Для тарування ТР на одну балку закріплюють досліджувані ТР, а на іншу - давач температури або еталонний кремнієвий ТР.

Для запобігання впливу магнітного поля балки зроблені з латуні.

Двобалковий деформуєвальний пристрій дозволяє задавати більші рівні деформації ( $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  в.о.) та вимірювати в теплових і магнітних полях.

Для закріплення напівпровідникових ТР на пружних елементах звичайно вживають клеї БФ-2, ВС ЮТ, ВЛ 931, Д 86 або цементу з пониженою температурою термообробки [59, 60, 61].

Стандартний режим наклеювання ТР такий: спочатку наносять нідшар клею ВЛ на очищену і знежирену поверхню, полімеризують, потім – наклеюють ТР і температурно полімеризують. Режими термообробки: кімнатна температура – 1 год; 70°C – 1 год; 140°C – 1,5 год; 180°C – 2 год. Проте товщину шару клею не завжди вдається контролювати достатньо точно.

Головні негативні фактори, які можуть спостерігатися під час наклепки ТР:

- завдяки різниці коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу ТР і балки після теплового затверднення тіло ТР стискається з можливими негативними наслідками (руйнування, механічні напруження, зсув робочої точки характеристик  $\Delta R/R = f(\varepsilon)$ , невідтворюваність характеристик і т.д.);

- повзучість і гістерезис.

Під повзучістю розуміють величину [72 ]

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Pi} = \Pi = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon\tau} - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon}, \quad (5.3)$$

де:  $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon}$ ,  $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon\tau}$  – прирости опорів відразу після зміни деформації балки на величину  $\varepsilon$  і через час  $\tau$  після встановлення деформації.

На практиці використовують відносне значення  $\bar{\Pi}$ :

$$\bar{\Pi} = \frac{\Pi}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\varepsilon}}. \quad (5.4)$$

Перевагою ТР з ниткоподібних кристалів є мала відносна повзучість. Наприклад, при деформації  $\varepsilon = +1 \cdot 10^{-3}$  в.о. через 1 год при довжині бази ТР  $l = 7$  мм величина  $\Pi$  не перевищує 0,2% [60, 61, 127, 128].

Незначні матеріальні витрати на виготовлення лабораторних деформувальних пристроїв та використання стандартного обладнання дає змогу тарувати ТР як в лабораторних, так і в виробничих умовах.

### **5.3. Нові типи тензорезистивних давачів з напівпровідникових ниткоподібних кристалів**

На сьогодні визнаним лідером в напівпровідниковій тензометрії є кремній  $p$  – типу [192]. Він може бути у вигляді об'ємних монокристалів, плівок (моно- чи полікристалічних). Особливо виділяються ниткоподібні монокристали, які мають мікронні розміри, досконалу структуру, добру механічну міцність. На їх основі створено велику групу ТР, в тому числі малобазних, з широкою тамою параметрів [73, 169].

Однак і ці ТР не позбавлені певних недоліків, зокрема мають різну чутливість до деформації одноосьового розтягу і стиску, наявність в ряді випадків гістерезису градувальних характеристик, тобто тривалої релаксації опору ТР під час зняття механічного навантаження, слабку чутливість до деформації гідростатичного тиску, що знижує їх функціональні можливості.

Досліджували ниткоподібні кристали інших елементарних напівпровідників –  $\text{Te}$ ,  $\text{Se}$  і з'ясовували можливості їх застосування в тензометрії. Монокристалічний  $\text{Te}$  через високі значення констант  $p$ 'єзоопору [8] більше відомий як матеріал для давачів всестороннього тиску [16, 242, 245], а  $\text{Se}$  мало використовується в тензометрії, особливо монокристалічний, хоча досліджувались його константи  $p$ 'єзоопору [246] і створені механічні давачі, тобто структури  $\text{Se} - \text{CdSe}$  з його участю [232]. Враховуючи подібність кристалічної структури і більшу ширину забороненої зони (2eV), можна очікувати тут певних фізичних ефектів.

Наші дослідження [61] охоплювали зняття й аналіз деформаційних характеристик, тобто залежності  $\Delta R/R_0 = f(\varepsilon)$ , де  $R_0$  опір недеформованого ТР,  $\Delta R$  – зміна опору під час деформації,  $\varepsilon$  – відносна деформація одноосьового розтягу або стиску, яку задавали в межах  $\pm 3 \cdot 10^{-3}$  в.о. Використовували і консольні балки, і спеціальні малогабаритні деформувальні пристрої. Користувалися клеєм ВЛ-931 і стандартною методикою приклеювання.

Вже перші дослідження показали високу теізочутливість кристалів Те. Коефіцієнт тепзочутливості  $K = \Delta R/R_0 \cdot \varepsilon$  досягав 150 і більше, спостерігається добра лінійність деформаційних характеристик. Тобто за чутливістю ТР не поступалися таким з р-Si, а перевищували їх, причому абсолютна зміна опору  $\Delta R$  при деформації  $\pm 510^{-4}$  в.о. могла становити 150... 400 Ом (в р-Si – 10 Ом).

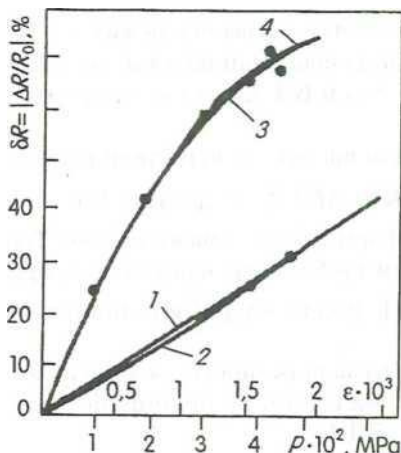
Ще однією особливістю ТР з Те була відмінність коефіцієнтів тепзочутливості під час розтягу і стиску. Як і для р-Si, ці коефіцієнти під час розтягу були вищими (див. *табл. 5.1*).

*Таблиця 5.1*

Параметри ТР з телуру

№ зразка	Питомий опір матеріалу, Ом·см	$K^*$ стиску	$K^{**}$ розтягу	Прим.
4а	2,0	149,8	171,0	Деформація $\pm 1,9 \cdot 10^{-3}$
4б	0,1	162,6	179,9	
5	1,8	123,4	149,8	
7	0,9	177,9	183,9	

Як бачимо, найвищі значення коефіцієнтів тепзочутливості забезпечував питомий опір кристалів  $p = 0,9 \text{ Ом см}$ , номінали опорів  $R_0 = 1000\text{--}1400 \text{ Ом}$ . Різниця коефіцієнтів  $K$  становила 3,25% для різних деформацій, в той час як для р-Si ТР вона була в два рази більшою, навіть при значно меншій деформації ( $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$ ).



*Рис. 5.13.* Деформаційні характеристики ТР з ниткоподібних кристалів телуру при великих рівнях деформації: 1 – одноосьовий стиск (навантаження); 2 – одноосьовий стиск (розвантаження); 3 – гідростатичний тиск (контакти симетричні); 4 – гідростатичний тиск (контакти асиметричні).

На *рис. 5.13* побудовано залежність  $\Delta R/R_0$  для високочутливих ТР з ниткоподібних кристалів Те (зразок №7, *табл. 5.1*), під час деформації стиску (максимальне значення  $\varepsilon = -2,6 \cdot 10^{-3}$  в.о.). Відносна



зміна опору при цьому досягає 50%. На *рис. 5.13* залежність 1 відповідає навантаженню, а 2 – розвантаженню. Під час розвантаження ТР могла спостерігатись деформація розтягу, тобто величина  $\Delta R/R_0$ , буде від'ємною (до 0,2%).

Проте  $R_0$  швидко релаксувало до початкового значення, па відміну від ТР з р-Si, де релаксація могла тривати хвилини. На цьому ж рисунку наведена залежність параметра  $\Delta R/R_0$  ТР з телуру від деформації гідростатичного тиску (до  $5 \cdot 10^8$  Па). Відносна зміна опору ТР досягає 80%. Різна конфігурація точкових контактів па несиметричних (крива 3) і симетричних (крива 4) ТР практично не впливає на хід деформаційних кривих. Залежності загалом експоненційні, а для тисків  $P < 5 \cdot 10^6$  Па добре апроксимуються прямими лініями. Відхилення від лінійності при цих тисках можуть бути пов'язані з наявністю складподеформованого стану (часто спеціально створюваного) в ТР, тобто з появою додаткових компонент тензора механічних напружень і тоді говорять, крім повздовжньої ( $K_1$ ), про поперечну ( $K_2$ ) і зсувну ( $K_{12}$ ) тензочутливість. В цьому випадку повздовжній опір ТР

$$\Delta R / R_0 = K_1 \cdot \varepsilon_1 + K_2 \cdot \varepsilon_2 + K_{12} \cdot \varepsilon_{12} + (1 + 2\nu) \cdot \varepsilon_1, \quad (5.5)$$

де:  $\varepsilon_1$  – повздовжня деформація;  $\varepsilon_2$  – поперечна;  $\varepsilon_{12}$  – зсувна в площині наклеювання ТР;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона ТР.

Для приклеєних ТР розглядається система пружний елемент – клей – ТР і тоді передача деформації ТР суттєво залежить від товщини і властивостей клею. За лінійних деформаційних характеристик ТР всі ці додаткові деформації легше фіксуються, ніж за нелінійних.

Процеси релаксації опору ТР після зняття деформації, на паш погляд, визначаються такими головними причинами:

- впливом поляризаційних ефектів у системі клей – поверхня ТР;
- можливою пластичною деформацією в поверхневих шарах ТР, яка виникає при деформації закруту внаслідок зсувних компонент, про що йшлося вище і що експериментально спостерігали в ниткоподібних кристалах системи Si-Ge [20];

- бар'єрними ефектами в контактах метал - напівпровідник (накопичення заряду), які проявляються через відхилення від лінійності вольтамперних характеристик (ВАХ) контактів, через наявність різниці між опорами ТР при двох полярностях струму.

Окрім цього, неоднорідність деформації може створюватись через копусність кристала, наявність дефектів і т. п. Наші дослідження показали, що для ТР з р-Si вирішальною є друга причина, а у випадку Те і Se – третя.

Зупинимось на характеристиках ТР з кристалів Se. За своєю морфологією і структурою вони подібні до кристалів Te. Це тригранні голки та стрічки з питомим опором  $0,03...0,1$  Ом-см, дірковою провідністю, номіналами опорів  $130...550$  Ом. Кращі результати щодо тензочутливості забезпечували більші значення цих параметрів. Коефіцієнти тензочутливості для деформації стиску тут, на відміну від Te і р-Si, більші, ніж для деформації розтягу. Наприклад,  $K_c = 130$ ,  $K_p = 110$ . Але, якщо вимірювати опір ТР при полярності, яка відповідає більшому значенню опору ТР  $R_q$ , то коефіцієнти вже будуть іншими  $= 140$ ,  $K = 90$  (при цьому деформаційна залежність нелінійна). На *рис. 5.14* подано деформаційні характеристики  $\Delta R/R_0 = f(\varepsilon)$  для невеликих значень деформації ( $< 8 \cdot 10^{-4}$  в.о.) для ТР з Se, а також для порівняння, з Te і р-Si, зняті на одному і тому ж деформувальному пристрої.

Як бачимо, лінійність характеристик охоплює невеликий діапазон деформацій ( $< 5 \cdot 10^{-4}$  в. о.). При більших деформаціях залежності відхиляються від прямолінійних вгору (стиск) (криві 4' і 5'), або вниз (розтяг) (криві 4 і 5). Для ТР з Te для двох полярностей практично не було різниці в характеристиках під час деформацій стиску (2' і 3'), в той час як під час розтягу тензочутливість у ТР з більшим  $R_0$  (крива 2) зростала, порівняно з меншим (крива 3). Залежності  $l$  і  $l'$  характеризують деформацію кремнієвих ТР (відповідно розтяг і стиск). Надлінійний характер залежності  $\Delta R/R_0 = f(\varepsilon)$  і висока тензочутливість під час стиску відкривають перспективи для застосування ТР з Se. Цей ефект пов'язаний, на наш погляд, з гідростатичною частиною тензора механічних напружень зі сторони клею і відповідною деформацією, що узгоджується з результатами праць [6, 41]. Зупинимось на температурних характеристиках ТР. Опір ТР із р-Si з підвищенням температури ( $20...60^\circ\text{C}$ ) зростає, а із Te і Se – падає, що властиве напівпровідникам з даною концентрацією вільних носіїв. Відносну зміну опору приклеєних до пружного елемента ТР наведено на *рис. 5.14*. Для ТР із р-Si і Se параметр  $\Delta R/R_{20}$  в кліматичному діапазоні температур змінюється на декілька відсотків. Для телурових ТР ця зміна більш суттєва із виходом залежності на насичення при  $t > 40^\circ\text{C}$ . Зміну тензочутливості ТР з температурою ілюструє *табл. 5.2*.

Зупинимось на електричних (омічних) контактах до ТР. В той час як для кремнієвих ТР такі контакти, створювані приварюванням Pt – мікродроту, а для кристалів Te – приварюванням Au – мікродроту, достатньо відпрацьовані і досліджені [152, 218], то для

селенових мікрокристалів їх опробувано вперше приварюванням Au, Ag, Pt – мікродротів.

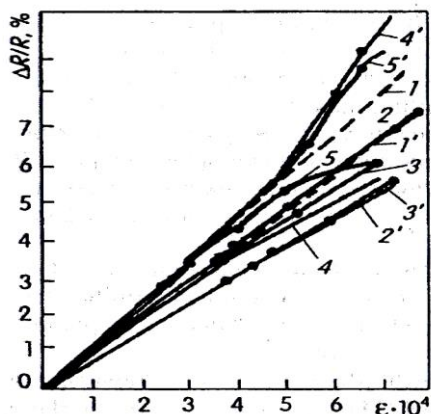


Рис. 5.14. Деформаційні характеристики ТР з різних напівпровідників:  
1,1' – p - Si; 2,3 і 2', 3' – Te;  
4,5 і 4', 5' – Se.

Таблиця 5.2

Коефіцієнти тензочутливості при різних температурах

ТР	Температура, °С			
	20	30	40	50
P-Si	117,0	115,0	112,4	110,4
Te	113,3	123,3	173,4	343,0
Se(2)	69,7	78,1	51,2	30,2

Вольтамперні характеристики контактів, створених на одному і тому самому зразку, наведені на рис. 5.15, а параметри – в табл. 5.3. Бачимо, що лінійність контактів добра (до струмів  $I_K < 5$  мА), хоча опір контакту  $R_K$  для двох напрямів струму через контакт відрізняється. Опір контактів досить високий – до 5% проти опору зразка, що не зовсім відповідає вимогам омичності, і перевищує опір контактів на p-Si і Te.

Таблиця 5.3

Параметри контактів до Se ТР

Контакт	Діаметр мікродроту, мкм	$R_K$ , Ом, прямий	$R_K$ , Ом, зворотний	$\Delta R_K/R_K$ , %	Нелінійність В АХ	
					зворотна	пряма
Au	40	16,9	18,8	11,2	1,7	1,1
Au	60	14,5	16,2	12,1	3,4	3,0
Pt	40	11,1	11,5	3,6	2,2	1,9
Ag	30	5,86	5,66	0,04	4,4	4,4

Згідно з вимогами до омичності контакту метал – напівпровідник з врахуванням умови  $W_{Hn} < W_M$ , де  $W_{Hn}$  і – робота виходу елек-

тронів з напівпровідника і металу, найкраще з досліджуваних металів підходила би Pt, однак, під час приварювання Ag – мікродроту, очевидно, виникають хімічні з'єднання ( $\text{Ag}_2\text{Se}$ ), які суттєво змінюють структуру контакту і понижують висоту бар'єра.

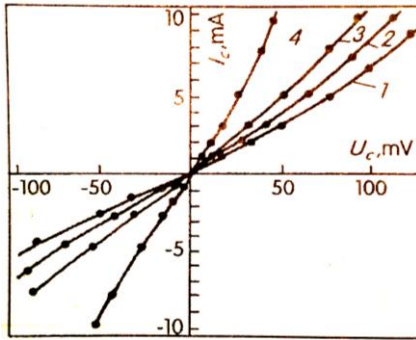


Рис.5.15. Вольтамперні характеристики контактів в до кристалів Se:

- 1 – Au діаметр 0,04мм;
- 2 – Au діаметр 0,06мм;
- 3 – Pt діаметр 0,04мм;
- 4 – Ag діаметр 0,03мм.

Діаметр мікродроту теж впливає на параметри контактів – зі збільшенням діаметра мікродроту  $R_K$  зменшується, що пов'язане, в першу чергу, з ростом потужності електричного імпульсу, затрачуваного на приварювання, хоча лінійність ВАХ контактів при цьому погіршувалася.

Таким чином, розглянуто особливості характеристик тепзорезисторів з елементарних напівпровідників (p-Si, Te, Se). Перспективним для досліджень конструкційних матеріалів під дією об'ємної направленої деформації є малогабаритні тепзорезистори з Te і Se.

#### 5.4. Ємнісні давачі для вимірювання тиску та деформації в залізобетонних конструкціях будівель і споруд.

Такі перетворювачі (давачі) являють собою електричні конденсатори, ємність яких міняється внаслідок зміни під дією вимірювальної величини площі перекриття обкладинок, віддалі між обкладинками або діелектричної проникності середовища, що знаходиться між ними.

За конструктивним вирішенням чутливих елементів (конденсатора) ємнісні давачі в основному поділяються на два типи: плоскопаралельні та коаксіальні.

Ємність давана з плоскопаралельними обкладинками, якщо інформативним параметром є віддаль між обкладинками  $d$  або діелектрична проникність середовища  $\epsilon$ , можна спрощено записати [123]:

$$C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot s) / d, \quad (5.6)$$

де:  $\epsilon_0$  – електрична постійна ( $8,87 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища між обкладинками;  $s$  – площа обкладинки;  $d$  – віддаль між обкладинками.

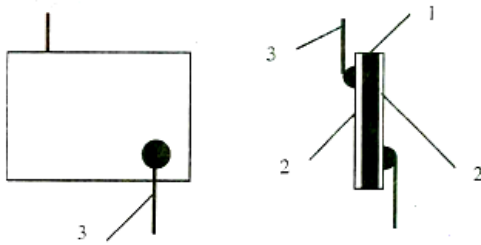


Рис. 5.16. Ємнісний давач тиску:

- 1 – діелектрична плівка;
- 2 – металічні електроди;
- 3 – відвідні контакти.

В реальних умовах вираз ємності давача з урахуванням впливу різних факторів складніший.

Давачі зі змінною віддаллю між обкладинками  $d$  (щілиною), як правило, використовують під час вимірювання малих переміщень (менше 1 мм). Це давачі тиску - одноосьового або гідростатичного.

Однак конденсаторні давачі мають ряд недоліків: складність конструкції, нестабільність чутливості, обмежені функціональні можливості, пов'язані з наявністю повітряного проміжку.

Відомі простіші і надійніші ємнісні давачі тиску на основі сегнетоелектриків, в яких під дією тиску змінюється статична діелектрична проникність  $\epsilon$  [59, 60, 61]. Проте вони розраховані на великі тиски (0,1-1 ГПа) та нечутливі до малих їх змін.

Використання в напівпровідникових тепзочутливих давачах полімерних мембран па металічних підкладках дозволило підвищити чутливість давачів і їх резонансну частоту [127, 128].

Однак це ускладнює технологію виготовлення давачів і полімерна мембрана має допоміжне функціональне призначення.

Конденсаторний ємнісний давач тиску містить діелектричну полімерну плівку, металічні електроди, розташовані з протилежних сторін плівки, відвідні контакти [83]. Під дією тиску або його пульсацій змінюється електрична ємність. Недоліком давача є порівняно низька чутливість, що вимагає використання підсилювачів, невисокі номінали ємності та їх зміни, що понижує завадостійкість та надійність приладу.

Всі ці та інші недоліки усуваються тим, що як полімер використовують співполімер полівінілового спирту з ефірами метакрилової кислоти.

Заміна полімеру з поліаміду па інший в якості діелектричної плівки забезпечує високі еластичні властивості діелектрика, модуль Юнга якого становить  $E=2,5 \cdot 10^5$  Па. Це суттєво збільшує чутливість давача до малих тисків; відносна зміна ємності  $\Delta C_0 > 20\%$  при  $P=10^5$  Па, а коефіцієнт чутливості до тиску  $\Delta C/C_0 - \Delta P$  дорівнює  $2 \cdot 10^{-6}$  Па<sup>-1</sup>, що приблизно на два порядки перевищує чутливість давача ти-

ску типу ДЕП. Початкова ємність такого давача  $C_0=100-150$  пФ, а це дозволяє вимірювати тиск з більшою точністю (похибка при значокоперемінних тисках  $<1\%$ ) і надійністю [127, 128].

Давач (рис. 5.16) містить діелектричну плівку 1, виготовлену зі співполімеру пролівінілового спирту з ефірами метакрилової кислоти, металічні електроди 2, розташовані з протилежних сторін плівки, відвідні контакти 3.

Давач виготовляють так. До діелектричної плівки 1 з максимальними розмірами  $20 \times 30$  мм і товщиною 0,2 мм приєднують з протилежних сторін металічні електроди 2 у вигляді мідної фольги товщиною 0,02 мм за допомогою клею, або іншим способом. Відвідні контакти 3 створюють припаюванням мідних дротин 0 0,05 мм до металічних електродів 2. Під час роботи давача в електромагнітних полях поверх металічних електродів 2 наносять металічні екрани.

Градування давача проводиться в статичному режимі. Розташовують його па горизонтальній підставці, від'єднують через відповідні контакти 3 екранованими провідниками до вимірювальної схеми (вимірювач ємності). Навантаження задають калібрувальними вантажами, створюючи одноосьовий тиск  $(0,1 - 1)10^5$  Па. Будують градуювальний графік в координатах  $\Delta C / C_0 - f(P)$ , де  $C_0$  – початкова ємність за відсутності тиску,  $\Delta C = C - C_0$  – її зміна під час навантаження (рис. 5.17).

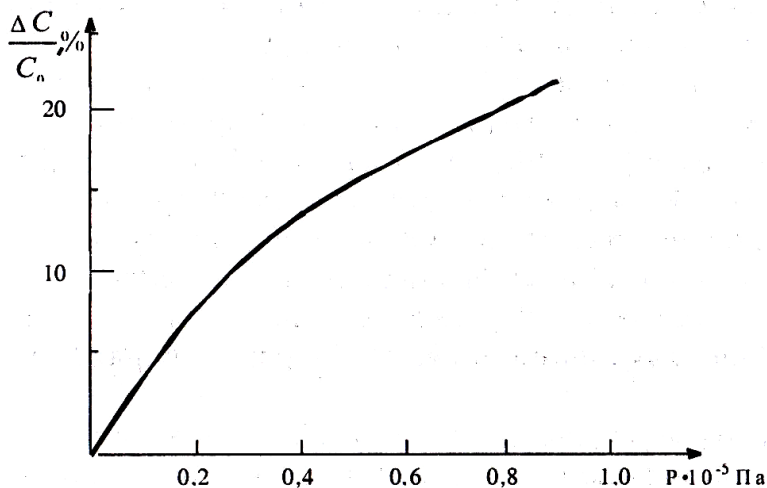


Рис. 5.17. Градуювальна характеристика давача тиску.

На основі такого графіка можна визначити невідомі тиски з високою точністю. Давач придатний для вимірювання динамічних та гідростатичних тисків.

Для визначення напружень, зусиль, деформацій у вологих середовищах використовують давані, дія яких базується на п'єзорезистивних, або п'єзоелектричних властивостях матеріалів (напівпровідників) [225].

Проте ці властивості залежать від параметрів навколишнього середовища, зокрема вологості, погіршуючись під її дією, що звужує функціональні можливості давачів.

Як вже згадувалось, відомі ємнісні давані деформації, що містять твердий діелектрик, виготовлений з полімеру, металічні електроди, розташовані з протилежних сторін діелектрика, відвідні контакти [83].

Недоліком їх є те, що твердий діелектрик, виготовлений з полімеру (поліаміду), не розрахований па роботу давана у вологих середовищах, наприклад бетони, не забезпечує достатньої чутливості при малих рівнях деформації, що звужує функціональні можливості давача.

Всі ці недоліки враховані у ємнісному давані деформації, що містить твердий діелектрик, виготовлений з вологочутливого співполімеру па основі полівіпілпіролідопу й ефірів метакрилової кислоти, з обох сторін якого розташовані металічні електроди та відвідні контакти. Давач має сферичну форму з радіусом кривизни – 100 мм.

Завдяки використанню в ємнісному давані деформації твердого діелектрика, який під час наводнення змінює свої пружні властивості, а також діелектричну пропикііість ( $\epsilon$ ), суттєво змінюється електроємність під дією деформації. Окрім цього, додаткова зміна параметрів давана обумовлена сферичністю поверхонь твердого діелектрика з радіусом кривизни  $R = 100$  мм (замість плоскопаралельних). Все це збільшує його чутливість і розширює функціональні можливості. Коефіцієнт чутливості давача  $\Delta C / C_0 \Delta P$  становить  $0,35 \cdot 10^{-3}$  Па при тиску  $P = 10^5$  Па (у прототипу –  $10^{-8}$  Па).

На *рис. 5.18* зображено ємнісний давач деформації, а на *рис. 5.19* – його характеристику. Як бачимо, наводнення співполімеру збільшує чутливість давана в 10 – 15 разів і крутизну характеристики (крива 1) порівняно з пенаводненням (крива 2).

Давач виготовляють так [128]. До твердого діелектрика 1, з вологочутливого співполімеру на основі полівіпілпіролідону з ефірами метакрилової кислоти, який має сферичні поверхні з радіусом кривизни  $R = 100$  мм і максимальними розмірами – 20 мм, товщиною 0,5 мм, від'єднують металічні електроди 2 за допомогою, наприклад, приклеювання мідної фольги товщиною 0,02 мм. Відвідні контакти 3 створюють припаюванням мідних дротин діаметром 0,05 мм до металічних електродів 2. Опісля цього наводнюють давач, занурюючи у

воду. Час наводнення вологочутливого співполімеру 1 (~20 год) підбирають так, щоб після зняття навантаження відновлювалась початкова ємність давача з точністю не менше 2% і залежність зміни ємності від часу наводнення була близька до лінійної.

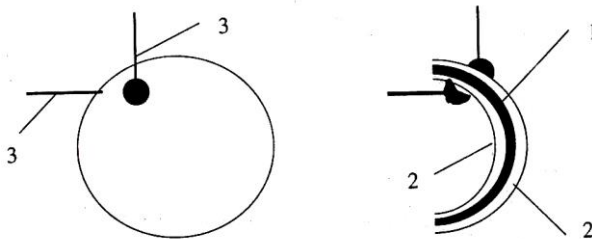


Рис. 5.18. Ємнісний давач деформації:

1 – діелектрична плівка; 2 – металічні електроди; 3 – відвідні контакти.

Давач працює так. Градуюють його, розташовуючи на горизонтальній підставці і задаючи одноосьову деформацію стиску за допомогою калібрувальних вантажів. Від відвідних контактів 3 за допомогою екранованих провідників давач під'єднують до вимірювача ємності, наприклад Е12-1А, який дозволяє визначити ємність з точністю  $\pm 0,01$ нФ. Навантаження забезпечує статичні тиски  $P - (0-5) \cdot 10^5$  Па.

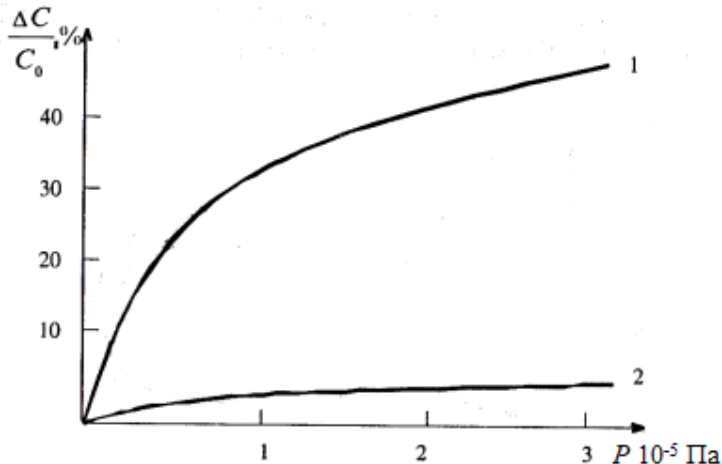


Рис. 5.19. Градувальна характеристика давача деформації.

На рис. 5.19 крива 1 описує наводнення давача в координатах  $C/C_0 = f(P)$ , де  $C_0$  – початкова ємність давача (10-30 пФ);  $\Delta C = C - C_0$  – абсолютна зміна ємності під дією деформації, а  $\Delta C/C$  – відносна зміна ємності. Для давача з вологочутливим співполімером  $\Delta C$  становить до 10 пФ при  $P = 5 \cdot 10^5$  Па, що суттєво перевищує  $\Delta C$  поліамідного давача (прототип), в якого ця зміна складає долі пФ. Ко-



ристуючись кривою 1, можна визначити досліджувані деформації та напруженія. Особливо зручно використовувати давач під час вимірювань у вологих середовищах – застигаючих бетонах, цементах та інших будівельних матеріалах і конструкціях; для вимірювань гідростатичних тисків у воді. Крива 2 на *рис. 5.19* показує, що без наводнення чутливість давана суттєво нижча, виходить на насичення, що утрудняє його використання без підсилювальних схем.

Таким чином, можна констатувати [128]:

1. Використання нових поліморфних матеріалів дозволяє створити високочутливі давачі для вимірювань зусиль, тисків, деформацій у конструкційних матеріалах.

2. Давачі можуть бути багатофункціональними, тобто вимірювати декілька фізичних параметрів, наприклад, деформацію і вологість.

3. Роботу давачів можна поєднати з електронними схемами і комп'ютером.

### **5.5. Застосування напівпровідникових тензорезисторних давачів для дослідження фізико-механічних характеристик бетонів з добавкою цеолітового порошку**

В окремих регіонах держави є місцеві будівельні матеріали, які можна використовувати для виготовлення бетонів як наповнювачі, тому дослідження властивостей таких бетонів стає актуальним [114].

Нижче викладено результати проведених авторами у ФМІ ім. Г.В.Карпепка НАН України та Мукачівському технологічному інституті експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей бетону, до складу якого входить цеоліт у вигляді дрібномолотого порошку.

Вихідні матеріали:

*Цемент* – нормандський Кам'янець-Подільського цементного заводу М500, густина –  $3,07 \text{ г/см}^3$ ; об'ємна маса –  $1,05 \text{ г/см}^3$ ; нормальна густина цементного тіста – 26%, початок схоплювання 2 год 35 хв, кінець схоплювання 4 год 35 хв.

*Пісок* – кварцовий Берегівського кар'єру Закарпатської області: густина –  $2,62 \text{ г/см}^3$ ; об'ємна маса –  $1,435... 1,475 \text{ г/см}^3$ ; вміст у піску глинистих та пиловидних домішок –  $1,5...2,0\%$ .

*Вода* – водопровідна, питна.

*Щебінь* – Мукачівського щебеневого заводу: об'ємна маса –  $1,370 \text{ г/см}^3$ ; питома маса –  $2,55 \text{ г/см}^3$ , фракція до 10 мм.

*Цеолітовий порошок* отримують шляхом подрібнення природного мінералу па цеолітовому заводі (м. Хуст Закарпатської області). Цеоліт – це природний алюмосилікат лужних та лужнозе-

мельних металів кристалічної структури. Порошок володіє абсорбційними, іонообмінними, каталітичними, детоксикаційними, бактеріцидними та іншими цінними властивостями. Кожна частина цеолітової муки має безліч пор діаметром 2...10 ангстрем. Поверхня цеоліту здатна адсорбувати молекули води, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> та інших неорганічних речовин, а також органічних речовин C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>3</sub>COOH та інші спирти, альдегіди, кислоти, а також жири. Він є хорошим сорбентом як із рідкої, так і з газоподібної фаз.

У внутрішньомолекулярний простір цеолітів можуть проникати тільки молекули, розміри яких не перевищують розміри вхідних віконць (пор). Тому їх називають ще молекулярними ситами. Наприклад, воду цеоліт може поглинати до 14% за масою, що пояснюється проникненням її у внутрішні пори, а молекули, розміри яких досить великі, сорбуються лише на поверхні. Це можуть бути циклопарафіни, ароматичні вуглеводи, жири тощо. Шляхом нагріву з цеолітів можна видалити воду. Наприклад, під час висушування при температурі 100...200°C він віддає 80...90% вологи. Повне видалення можливе при 500...600°C. За нормальних умов у цеоліті може залишатись 3...7% вологи. Пізніше частково або повністю дегідратований цеоліт здатний знову реадсорбувати воду та інші газоподібні речовини залежно від умов його використання.

#### Коротка характеристика цеолітового порошку.

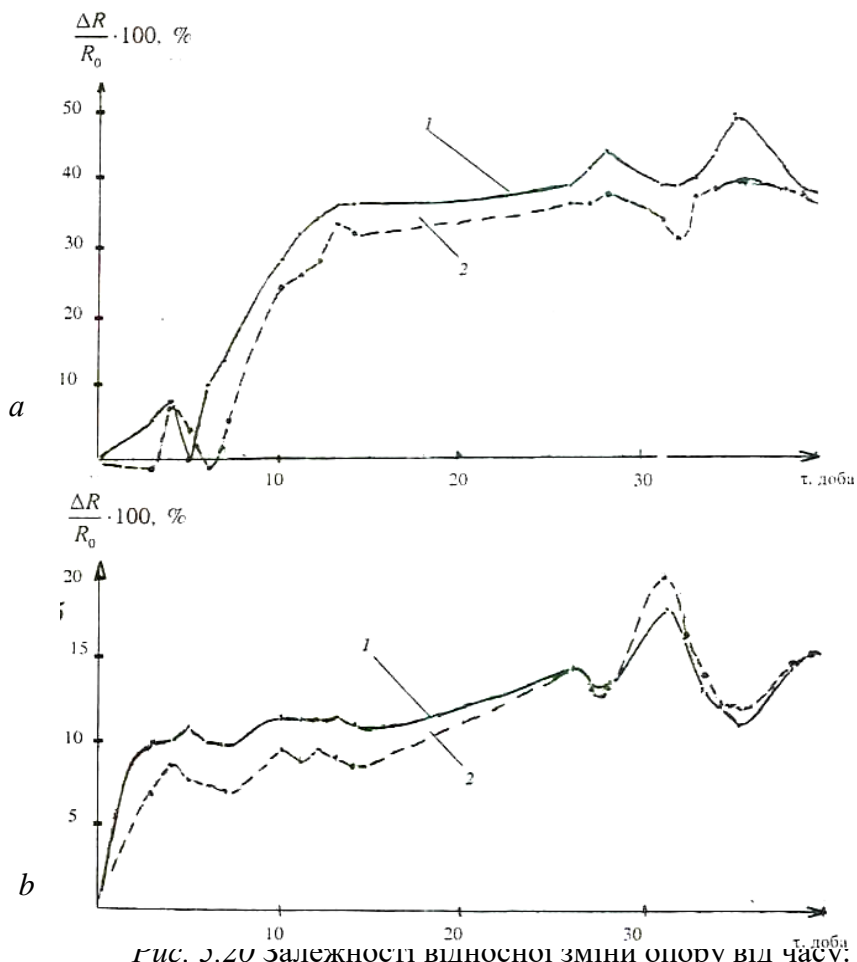
Вміст цеоліту в породі	72..	.75 %
Вартість відпускання	50..	.60 \$ за тону
Густина насипна	2..	.2.5 г/см <sup>3</sup>
Поглиняльпа здатність води	12.5..	.14 % маси
Дисперсність порошку	20..	.80 мк
Термічна стійкість		659 °C

Дослідні зразки – куби з ребрами 100 мм та балки 40x40x160 мм виготовлені з бетону класу міцності на стиск С15 трьох складів: трикомпонентного та з добавкою цеолітового поршкку 5 і 10 % від ваги цементу. Склади бетонів наведено в *табл. 5.4*

*Таблиця 5.4.*

Склади бетонів

Склад бетону	Проектна марка	Розхід матеріалів на 1 м <sup>3</sup> бетону, кг				
		цемент	пісок	щебінь	вода	цеоліт
1	С15	300	880	1100	120	-
2	С15	300	875	1090	120	15
3	С15	300	870	1080	120	30



Гис. 5.20 Залежності відносної зміни опору від часу.  
 а – дротяний ТР; б – напівпровідниковий: 1 – звичайний бетон;  
 2 – із домішкою цеоліту.

Всі зразки виготовляли у жорстких металевих формах. Ущільнювали бетонну суміш на вібростенді. Бетони після пропарки тверднули в природних умовах при температурі 15...20°C і відносній волозі повітря 80...90 %. Для досліджень зсідання бетонів використали балки 40x40x160 мм. Посередині бокової трапі зразка наклеювали дротяні тепзорезистори (ТР) Московського заводу дослідних конструкцій, виробів і обладнання (ЦНДІБК) з довжиною бази 50 мм, коефіцієнтом тепзочутливості  $5=2,21$ , номіналами опору  $R = 402,3 \pm 0,3$  Ом. Поряд із цими ТР розташовували напівпровідникові елементи з ниткоподібного монокристала Те, чутливість якого в 50 разів вища. Довжина бази 5...8 мм, поперечний розмір – 0,15 мм. Номінали опору

500...700 Ом. Приклеювали елементи клеєм ВЛ-931 [128]. Залежності відносної зміни опису від часу наведено на *рис. 5.20*.

Так порівнювали часову зміну лінійних розмірів зразків зі звичайного бетону та зразків з додаванням 10% цеоліту; осадка відбувалося за нормальних умов. На рисунку побудовано залежності відносної зміни опору  $AR/R_0$  двох зразків, визначено дротяними (*a*) та напівпровідниковими (*b*) ТР. Зміна опору тут пропорційна часовій зміні довжини брусків (до 40 діб).

Встановлено, що усадка звичайного бетону інтенсивніша, проте пульсації в зміні розмірів більші в бетоні з цеолітом. Початкові стадії зміни (за даними напівпровідникових ТР – 3 доби, дротяних – 6 діб) пов'язані, очевидно, з полімеризацією клею. Протягом 14-16 діб розміри зразків монотонно зменшуються.

Ряд екстремумів на графіках спочатку фіксують напівпровідникові ТР, а згодом – через 1-2 доби - дротяні. Екстремуми на 31 - 32 добі (максимум для напівпровідникових ТР і мінімум для дротяних), а також на 35 добі спричинені флуктуаціями температури, оскільки коефіцієнти тензочутливості мають різні температурні знаки. І, накінець, через 40 діб зміни лінійних розмірів зразків вирівнюються.

Осадку також визначали індикатором лінійних переміщень  $\Delta/l_0$ , який за 30 діб зафіксував зміну лінійних розмірів = 0,03 мм, що збігається з показами напівпровідникових ТР.

Таким чином, осадка зразків з часом набуває монотонного характеру, спостерігається деяка різниця в інтенсивності осадки зразків із цеолітом, яка при вимірюванні напівпровідниковим ТР коливалась у межах 5%.

## 5.6. Висновки до розділу 5

Багаторічні обстеження та випробування бетону, залізобетонних конструкцій будівель і споруд в яких постійно потрібно визначати напружено-деформований стан як у монолітних так і збірних конструкціях при тимчасових і довготривалих навантаженнях добре зарекомендували себе давачі тиску і деформації. Цій проблемі присвячено розробку нових тензорезистивних давачів тиску і деформації і ін. характеристик, результати яких наведено у цьому розділі на аналізі яких можна сформулювати наступні висновки:

1. Представлено і описано новостворені типи багатофункціональних сенсорів на основі досліджень ниткоподібних кристалів. Зокрема, описано конструкцію давачів та їх градувальні характеристики при різних рівнях деформації. Тут представлено також

схему і градувальні характеристики давачів під час вимірювання температури та магнітного поля чутливого елемента. Потрібно звернути увагу на конструкцію чутливого сенсора для вимірювача магнітного поля і температури та градувальні характеристики терморезистора та градувальну характеристику магніторезистора. Розглянемо також одноелементний сенсор для вимірювання температури і магнітного поля, градувальні характеристики давачів температури і магнітного поля. Зупинимось на багатофункціональному сенсорі для вимірювання одночасно трьох параметрів – деформації, температури і магнітного поля.

2. Розроблено і описано тут пристрої для досліджень тензорезистивних давачів вимірювання деформацій, побудованих з ниткоподібних кристалів в основу яких покладено тензорезистивний ефект. Перетворювачем механічного сигналу є пружний елемент. Зокрема, чутливішим є балковий пружний елемент. Наведено конструкції деформуального пристрою основного та спрощеного деформуального пристрою та описано принцип дослідження на пристроях і інших деформуальних пристроях.

3. Розглянуто в цьому розділі також нові типи тензорезистивних давачів з напівпровідникових кристалів. Тут наведено дослідження ниткоподібних кристалів із кремнію, телурові Те і селенові Se і з'ясували їх можливості застосування, але потрібно пам'ятати, що всі вони мають і певні недоліки. Наведено результати досліджень деформаційних характеристик з ниткоподібних кристалів телуру при великих рівнях деформації. Також наведено порівняльні дані про деформаційні характеристики ТР з різних напівпровідників.

4. Представлено дослідження ємнісних давачів вимірювання та деформації в залізобетонних конструкціях. Зокрема, описано конструкцію ємнісних давачів тиску. Наведено градувальну характеристику давачів тиску та ємнісний давач деформації з градувальною характеристикою. Описано також можливості застосування напівпровідникових тензорезистивних давачів для дослідження фізико-механічних характеристик бетонів з добавкою цеоліту.

## 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОСТУ ТРІЩИНИ

### 6.1. Загальні відомості

Експериментальна механіка руйнування (ЕМР) [167] досліджує властивості конструкційних матеріалів, що визначають їх опір руйнуванню, встановлює критерії руйнування для розрахунків міцності тіл з тріщинами на різних стадіях руйнування. Сюди ж відносяться задачі встановлення гранично допустимих дефектів та отримання вихідних даних для прогнозування росту тріщини в конструкції.

Виявлення залежності між навантаженням, що діє па тіло, часом і параметром руйнування (найчастіше - це довжина тріщини та її розкриття) - експериментальна задача механіки руйнування. Залежність параметра руйнування від часу або силового фактора дістала назву діаграми руйнування [163,167].

Розмір тріщини в поперечному напрямі (розкриття), час, переміщення, величина пластичної зони, напруженість та деформація перед вершиною тріщини вимірюються традиційними методами ЕМР. Привертає увагу вимірювання довжини та швидкості росту тріщини.

Швидкість росту тріщини лежить у межах від  $10^{-8}$  (характерно для втомної тріщини та тріщини уповільненого руйнування) до  $10^3$  мс. Її розміри коливаються від долей міліметра до декількох метрів. Час, протягом якого зразок руйнується, змінюється від декількох мікросекунд (крихке руйнування) до кількох діб і навіть місяців (втомне й уповільнене руйнування).

Руйнування відноситься до незворотних процесів і дослідження не можна повторити на одному зразку, а необхідно готувати декілька (5-6 зразків). Слід звернути увагу па надійність вимірювання та враховувати можливість зміни властивостей матеріалу.

Ріст тріщини в пластичних матеріалах супроводжується значною пластичною деформацією, яка впливає па покази вимірювальних приладів так само, як і тріщина. Тому треба врахувати і відфільтрувати такий вплив.

Для забезпечення методологічної та приладної бази ЕМР використовуються такі методи та прилади, як і в дефектоскопії [167]. Однак завдання ЕМР та дефектоскопії різні. Остання виявляє дефект, визначає його координати, і лише опісля - його розміри. Завдання ЕМР – точно і безперервно вимірювати довжину росту тріщини [90, 128].

У приладах дефектоскопії та ЕМР використовують одні і ті ж фізичні явища.

Досліджуючи розповсюдження тріщини різними методами, за основу взяли взаємодію тріщини з фізичним полем або речовиною, в результаті якої виникає те чи інше фізичне явище, па якому базується принцип побудови вимірювального перетворювача, що здійснює однозначний функціональний зв'язок довжини тріщини з вихідним сигналом. Беручи за основу вид фізичного поля або речовину, можна класифікувати всі методи вимірювання тріщини і розділити їх на дев'ять груп. Для кожної характерне використання взаємодії тріщини з певним фізичним полем або речовиною в будь-якому її стані [1, 167]:

1. Квазістатична взаємодія тріщини з пружним полем лежить в основі методу пружної податливості. Змінне пружне поле дає можливість пов'язати зміну розмірів тріщини зі зміною частоти власних коливань тіла з тріщиною. Взаємодія тріщини з пружною хвилею змінює напрям росту тріщини, при цьому на поверхні тіла утворюються характерні сліди (лінії Вальнера). Пружні хвилі, що Виникають під час квазістатичної взаємодії. Тріщини з пружним полем, можна використати для створення різних ультразвукових та фрактографічних методів.

2. Взаємодія тріщини з електричним полем. В основі методу електроопору та методу різниці електричних потенціалів. їх принцип полягає в пропусканні через струмопровідний зразок електричного струму та вимірювання або зміни опору зразка, або зміни поля електричних потенціалів, однозначно пов'язаних з довжиною тріщини.

3. Взаємодію тріщини з магнітним полем використовують для дослідження руйнування феромагнітних матеріалів. Перебудова конфігурації електричного і магнітного поля зміною розмірів тріщини, на відміну від пружного поля, проходить миттєво. Використовуючи метод взаємодії тріщини з магнітним полем, можна створити майже безінерційні прилади, оскільки Поле змінюється майже в два рази Півидше, ніж максимальний ріст тріщини.

За допомогою магнітного Поля та явищ, пов'язаних з ним, розроблено методи ферографії, ферозондових давачів, порошковий магнітний. В практиці використовують сигнальні магнітні давачі для вимірювання швидкості закритичного руйнування великих зразків.

4. На взаємодії тріщини зі світловим полем ґрунтуються багато оптичних та візуальних методів. Враховуючи, що людина отримує значну частину інформації через органи зору, градування приладів протікає візуально, оптичний метод виділений в окрему класифікаційну групу.

Світлове поле, що використовується, Може бути і постійним, і змінним. Одним з цікавих методів оптики є голографія.

5. Взаємодія тріщини з електромагнітним полем вихрових струмів, що утворюється у провідних Зразках від дії Зовнішнього джерела випромінювання, зумовлює зміну їх величини залежно від росту тріщини і є мірою довжини та глибини тріщини.

6. Взаємодія матеріалу зразка з тріщиною з рентгенівським або гамма- випроміннюваннями не знайшла широкого використання в ЕМР через шкідливість цих випромінювань для людини. Крім того, непрактичність методу пов'язана з низькою чутливістю під час кутового (неперпендикулярного до площини зразка) опромінення. Він частіше використовується у дефектоскопії.

7. На взаємодії тіла з тріщиною (або його поверхні) з рідиною базуються методи проникальних рідин та фарбування зламу. Капілярний ефект тріщини, що просувається, приводить до переміщення рідкого барвника за її фронтом. Інтенсивний ріст тріщини викликає відрив фронту від рідини, що дозволяє визначити критичну її довжину за зафарбованою частиною зламу.

8. Тріщина, що утворилася в зразку, діє на матеріал, нанесений на поверхню зразка. При цьому міняється напружений стан матеріалу, або він руйнується. Використовуючи це явище, створили методи розривних сигнальних давачів, фотопружних та крихких покриттів.

9. В окрему групу виділено перспективний метод взаємодії тріщини з газом. Застосовуючи пневматичні тензometri та прилади, що реєструють зміну об'єму газу залежно від росту тріщини, можна досліджувати кінетику руйнування.

Для вивчення кінетики руйнування різними методами першочергове значення має правильний вибір приладів. Будь-який прилад можна розглядати як сукупність вимірювальних, перетворювальних, обчислювальних та реєструвальних лапок, з'єднаних між собою відповідно з різними структурними схемами.

Прилади можуть поділятися за структурними схемами на каскадні, диференціальні, логарифмічні, компенсаційні, багатоканальні та сканувальні.

Каскадні побудовані за найпростішою структурною схемою, коли всі ланки з'єднані між собою послідовно: вихідна величина кожної ланки вхідна для наступної.

Структурна схема диференціального приладу складається з двох незалежних одностипних перетворювачів, вихідні сигнали яких віднімаються.



Аналогічна структурна схема логарифмічних приладів. Різниця полягає в заміні ланки віднімання на ланку ділення. Перевагою логарифмічного методу є те, що фактори, які однаково впливають на обидва канали, можуть бути скомпенсовані на всьому діапазоні зміни вхідної величини.

У приладах, побудованих за компенсаційними схемами (врівноважені мости), вхідна величина компенсується іншою, що однорідна з першою. Сигнал розбалансу, виділений схемою порівняння, підсилюється і подається на вхід ланки, яка створює компенсувальну дію. Для того, щоб компенсація була безперервною, необхідно створити контур від'ємного зворотного зв'язку. Точність компенсаційного приладу визначається точністю ланки, що створює компенсаційну дію. Значною перевагою таких приладів є мале споживання енергії на вході.

Велику групу приладів складають скаиувальпі. На відміну від приладів з нерухомими або рухомими давачами, давач сканувального приладу безперервно рухається за заданою програмою. Поки давач не дійшов до тріщини, його сигнал рівний нулю. Якщо він знаходиться в межах тріщини, з'являється сигнал певної величини, який зникає, коли давач виходить за межі другого кінця тріщини. Тривалість перетвореного приладом прямокутного імпульсу є мірою довжини тріщини. Такі пристрої можуть вимірювати довжину лише тих тріщин, швидкість росту яких набагато менша, ніж швидкість сканування давача. Давачами можуть бути ультразвукові, струмовихрові, ферозопдові перетворювачі.

Для дослідження довжини тріщини, швидкість росту якої значна, використовують електронні скаиувальпі прилади. На поверхні зразка розташовують систему давачів, розміщених суцільно рядами, аналогічно растру кінескопа. Опитують кожний давач послідовно за програмою. Швидкість сканування висока. Крім розрахунку довжини тріщини, такі пристрої видають інформацію і про напрям її росту.

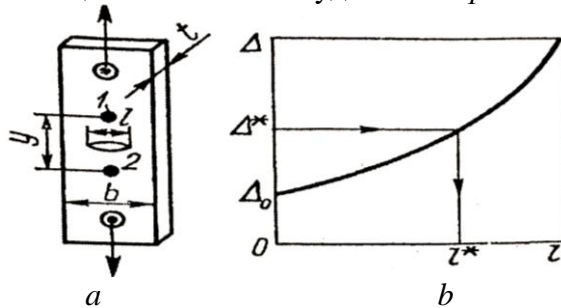
## 6.2. Метод пружної податливості

Поява і розповсюдження тріщин у пружно навантаженому твердому тілі супроводжується зміною напруженого стану в ділянці навколо тріщини [90,167]. Тому зміна відстані між двома фіксованими точками тіла (або пружне зміщення  $\Delta$  цих точок), розташованими по різні сторони від площини тріщини, є функцією характерного розміру тріщини (наприклад, площі  $S$  плоскої тріщини), навантаження  $P$ , яке діє на тіло, площі поперечного перетину тіла  $F$  в площині тріщини й пружних властивостей матеріалу – модуля пруж-

жності  $E$  та коефіцієнта Пуассона  $\mu$ :

$$\Delta = \Delta(S, P, F, E, \mu). \quad (6.1)$$

Отже, для зразка визначених розмірів зміщення  $\Delta$  під дією постійної сили  $P$  є однозначна функція довжини тріщини  $l$ , й цю обставину можна використати для її виміру, якщо відома залежність. Для плоского зразка шириною  $b$  й товщиною  $t$  з центральною тріщиною довжиною  $l$  ця залежність побудована на *рис. 6.1, b*.



*Рис. 6.1.* Плоский зразок з центральною тріщиною, що розтягується (а) та його тарувальна крива (b)

Фактично це статична характеристика вимірювального перетворювача довжини тріщини зміщення при заданому навантаженні  $P$ . Однак, характеристика цього перетворювача залежить не тільки від геометрії зразка, але й від ітружних властивостей матеріалу. Тому на практиці доцільніше використати не зміщення  $\Delta$ , а величину

$$z = \lambda Et = E\Delta / \delta b, \quad (6.2)$$

де:  $\lambda = \Delta/P$  – податливість частини зразка між точками 1 і 2;  $\sigma = P/bl$  – номінальна напруга в перетині зразка без тріщини.

Тоді рівняння набуває вигляду:

$$z = \lambda Et = z(y/b, l/b, \mu), \quad (6.3)$$

де  $y$  – віддаль між точками 1 і 2, які знаходяться на осі зразка симетрично відносно тріщини.

Залежність  $z$  від  $l/b$  (*рис. 6.2.*) за постійного  $y/b$  зберігає вигляд для всіх подібних зразків у разі малого впливу матеріалу зразка ( $\mu$  від матеріалу до матеріалу міняється незначно). Визначивши під час навантаження зразка 2, знаходимо відносну довжину тріщини  $l/b$ .

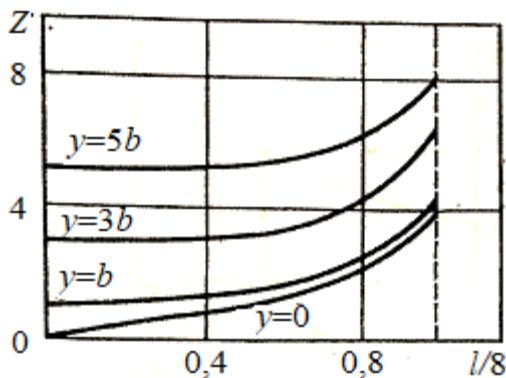
Оскільки, при дослідженнях конкретного матеріалу зі зміною довжини тріщини змінюється тільки податливість  $\lambda$ , то розглянутий метод отримав назву методу податливості (П–метод). Необхідно звернути увагу, що для виміру тріщини цим методом слід або навантажити зразок, або змінити навантаження па зразку, визначити відповідну зміну  $\Delta$ , а після цього обчислити величину  $\lambda = d\Delta/dP$ .

Зауважимо, що П-метод особливо зручний для дослідження кінетики втомних тріщин, бо під час втомних досліджень є можливість багаторазового одночасного виміру  $P$  і  $\Delta$ . На *рис.6.3* показана блок-схема логометричної установки для виміру втомної тріщини П-методом, розробленої фірмою MTS (США). Зміщення  $\Delta$  і навантаження  $P$  на зразку 1 вимірюються давачем зміщення 2 і динамометром 3. Відповідні сигнали з підсилювачів 4 і 5 надходять на лічильний блок 6. Градууювальна крива (*рис. 6.2*) апроксимується поліномом

$$\frac{l}{b} = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + A_3 z^3. \quad (6.4)$$

Коефіцієнти цього полінома задаються ручками управління на блоці 6. Аналогічно вводяться і величини  $b$ ,  $t$  і  $E$ . На виході блока 6 з'являється сигнал, пропорційний довжині тріщини, що реєструється самописцем 7 як функція часу або кількості циклів навантаження  $N$ .

Для визначення моменту старту тріщини П-методом бажано використати диференціальний засіб виміру; сигнал одного (основного) каналу формується описаним методом, сигнал другого одержують від давача, що заміряє зміщення на допоміжному зразку з тупішим надрізом або тріщиною, встановленому послідовно з основним зразком.



*Рис.6.2.* Безрозмірні тарувальні криві для зразка, показаного на *рис.6.1.*

П-метод достатньо успішно реалізується під час досліджень товстих зразків. При спостереженні зростання тріщин у тонколистових зразках необхідно рахуватися з можливістю виникнення більших помилок, зв'язаних зі згином та коробленням тонких зразків. Зменшити помилки можна, застосовуючи два давачі зміщення, розташовані на протилежних сторонах зразка, й усереднюючи їхні покази.

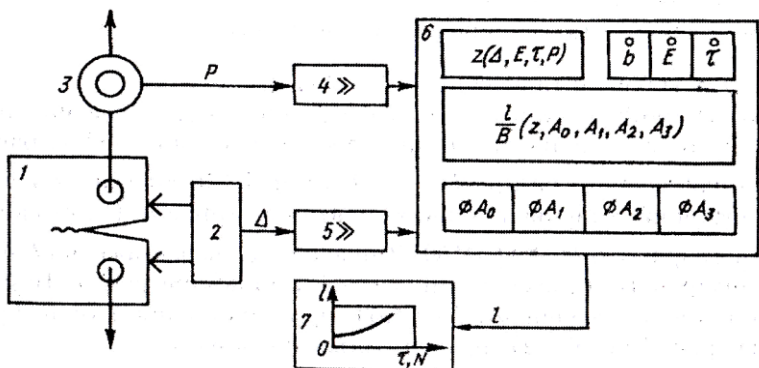


Рис. 6.3. Блок-схема установки для вимірювання довжини втомної тріщини

### 6.3. Ультразвуковий метод

Ультразвуковий (УЗ) метод дослідження руйнування заснований на взаємодії тріщини з пружними хвилями ультразвукового діапазону частот (до декількох мегагерц), спеціально введених у взірець. Оскільки довжина УЗ-хвилі порядку 1 мм, то з'являється можливість створити напрямлені випромінювання УЗ-коливань, діаграма випромінювання яких має кут

$$\alpha = \lambda_B / D, \quad (6.5)$$

де:  $D$  – діаметр випромінювача;  $\lambda_B$  – довжина УЗ-хвилі.

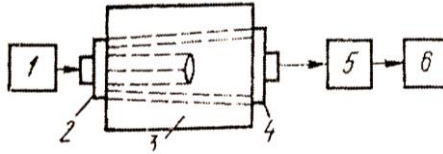
Взаємодія тріщини з УЗ-хвилями спричиняє їхнє відбиття від тріщин і дифракційні явища на її фронті, що приводять до відхилення УЗ-хвиль від прямолінійного розповсюдження. Взаємодія тріщини з УЗ-хвилями зникає, коли характерний розмір тріщини  $\delta_{tr}$  в площині, перпендикулярній розповсюдженню УЗ-хвиль, стає менший  $\lambda_B/2$ . Істотну роль відіграє також відстань від тріщини до приймачів УЗ коливань  $L$ . Для наближених оцінок характерного розміру мінімальної тріщини  $\delta_{tr}^{\min}$  (поріг чутливості УЗ-методу) можна скористатися виразом

$$\delta_{tr}^{\min} = \sqrt{2\lambda_B L}. \quad (6.6)$$

Мала довжина УЗ-хвилі є основою для розгляду явищ розповсюдження, відбиття, переломлення й фокусування УЗ-хвиль засобами геометричної акустики.

Найбільш розповсюджений тіньовий (ТУЗ-метод) та імпульсний ехометод (ЕУЗ-метод). При тіньовому методі УЗ-коливання

вводять, як правило, з однієї сторони зразка й приймають з іншої, як це показано на *рис. 6.4*. Як приймачі й випромінювачі використовують пластинки з п'єзоелектричних матеріалів (кварц, титанат барію й ін.). Випромінювання й приймання здійснюють через топкий шар контактного мастила між зразком і п'єзоелектричним перетворювачем. При використанні ТУЗ-методу необхідно, щоб тріщина відкидувала па приймач чітку “звукову тінь”. Якщо приймач знаходиться далеко від тріщини, то “звукова тінь” в результаті дифракції не доходить до нього, й чутливість різко падає.



*Рис. 6.4.* Блок схема для дослідження ТУЗ-методом:

1 – генератор; 2 – випромінювач; 3 – зразок; 4 – приймач; 5 – підсилювач;  
6 – індикатор УЗ-коливань.

В імпульсному ЕУЗ-методі приймач УЗ-коливань, розташований з тієї ж сторони, що й випромінювач, приймає відбиті від поверхні тріщини сигнали, амплітуда яких є мірою довжини тріщини. Звичайно приймач суміщають з випромінювачем. Під час випромінювання зондувального УЗ-імпульсу тривалістю порядку декількох мікросекунд приймач не працює. Тому тріщина повинна розташуватися на відстані від приймача-випромінювача більшій від “мертвої зони”  $L_{min}$ :

$$L_{min} = V_{зв} \tau / 2, \quad (6.7)$$

де:  $\tau$  - тривалість УЗ-імпульсу;  $V_{зв}$  - швидкість розповсюдження УЗ-хвиль.

Паузи між зондувальними імпульсами  $\Delta\tau$  повинні перевищувати час, необхідний для проходження УЗ-імпульсом подвійної відстані  $H$  від випромінювача до “дна” зразка:

$$\Delta\tau > 2H / V_{зв}. \quad (6.8)$$

Звичайно  $\Delta\tau$  має порядок декількох мілісекунд.

На *рис. 6.5* наведена структурна схема імпульсного ЕУЗ-дефектоскопа. Хронізатор виробляє пускові імпульси з періодом проходження  $\Delta\tau$ , які запускають розгортку осцилографа й водночас викликають генерацію потужних високочастотних зондувальних імпульсів, перетворених п'єзовипромінювачем в імпульси УЗ-коливань. На екрані осцилографа зондуєчий імпульс видимий на лівій стороні лінії розгортки. Через деякий час на приймач надхо-

дить імпульс, відбитий від тріщини, а після цього й імпульс, відбитий від дна зразка. Між амплітудою  $A_T$  імпульсу, відбитого від тріщини, й її довжиною існує однозначна залежність, яку можна встановити градуванням.

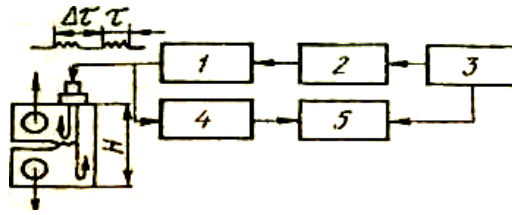


Рис.6.5. Блок-схема для досліджень ехо-методом:

1 – генератор УЗК; 2 – хропізатор; 3 – генератор розгортки; 4 – підсилювач; 5 – реєструвальний прилад.

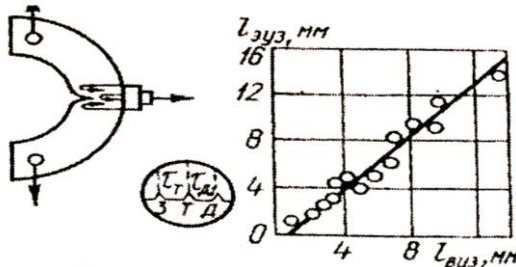


Рис.6.6. Схема вимірювання довжини тріщини ЕУЗ-методом (а) та його експериментальна перевірка (б)

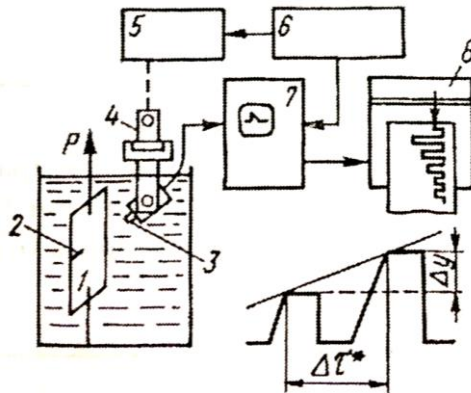


Рис.6.7. Схема сканувальної установки для вимірювання швидкості росту тріщини

За міру довжини тріщини можна використати час  $\tau$ , рівний різниці часу прибуття сигналу від тріщини  $\tau_{tr}$  й відбитого від дна зра-

зка  $\tau_d$ . Але для цього необхідно, щоб і напрям зростання тріщини збігся з напрямом випромінювання й приймання УЗ-імпульсів (рис.6.6, а). За час  $\tau = \tau_d - \tau_t$  УЗ-імпульс мине відстань, рівну подвійній довжині тріщини  $2l$ , отже,

$$l = 0,5V_{зв} (\tau_d - \tau_t) \quad (6.9)$$

Як бачимо (рис. 6.6, b), значення довжин тріщин, отриманих ЕУЗ- методом зі застосуванням вищенаведеної формули й виміряних візуально за втомними мітками на поверхні зламу зруйнованого зразка, збігаються. Природно, що таким методом можна вимірювати тріщини, що розповсюджуються зі швидкостями принаймні на два порядки меншими, ніж швидкості УЗ-хвиль в матеріалі зразка.

Окрім схем вимірів тріщин УЗ-методом з нерухомими випромінювачами-приймачами існують схеми з рухомими. На рис.6.7. подано схему сканувального пристрою для вимірів швидкості зростання тріщини в покритті на зразку з полімерного матеріалу [174]. Зразок 1 поміщали в ванну, наповнену рідиною, вплив якої на швидкість зростання тріщини 2 необхідно дослідити, й навантажували постійною силою. УЗ-давач 3 переміщався за допомогою спеціального пристрою 4 й приводу 5 вздовж напрямку поширення тріщини у зразку. Програма сканування УЗ-давача задавалася блоком управління з приводом 6. Коли амплітуда відбитого від тріщини сигналу перевищувала деякий рівень, на виході УЗ-дефектоскопа 7 з'являлася напруга, яка лінійно зростала в часі і подавалася на самописець 8 зі стрічковою діаграмою. Перо самописця відхилялося до тих пір, поки на вході дефектоскопа був сигнал від тріщини. Зникнення сигналу гальмувало зростання напруги на виході дефектоскопа, яка залишалася постійною деякий час, а потім різко падала до нуля. Тріщина вимірювалася тільки на "прямому" ході.

#### 6.4. Метод різниці електричних потенціалів

Ефект взаємодії тріщини зі струмом, що проходить зразком, широко використовують для виміру довжини тріщини. Поширення тріщини супроводжується збільшенням електричного опору усього зразка, що зумовлено зміною геометрії зразка й поля електричних потенціалів навколо тріщини. За різницею електричних потенціалів (РЕП)  $\phi$  між двома будь-якими точками зразка (потенційними контактами) можна знайти довжину тріщини  $l$  за умови постійності струму  $I$  через зразок (рис. 6.8). Абсолютна величина  $\phi$  визначається також силою струму  $I$ , що проходить через зразок, площею попе-

речного перерізу зразка  $F$  й електроопором матеріалу зразка  $\rho$ :

$$\varphi = \varphi(l, I, F, \rho). \quad (6.10)$$

Ця залежність являє статичну характеристику РЕП-перетворювача довжини тріщини  $l$  в РЕП  $\varphi$ .

Для плоского зразка шириною  $b$  і товщиною  $t$  з центральною тріщиною  $l < b$  (рис. 6.8, а) залежність має вигляд [90].

$$\varphi = \frac{\rho \cdot I}{b \cdot t} \sqrt{l^2 + y^2}, \quad (6.11)$$

де  $y$  - відстань між вимірювальними точками 1 і 2, розміщеними на осі зразка симетрично відносно тріщини.

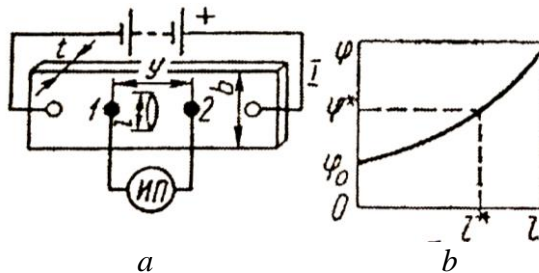


Рис. 6.8. Плоский зразок для досліджень методом РЕП (а) та тарувальна крива (b)

Користуватися РЕП-перетворювачем з такою характеристикою 4 незручно, бо її вигляд залежить від розміру та матеріалу зразка, а також сили струму. Краще вживати характеристику

$$\Phi = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_{34}} = \frac{\sqrt{l^2 + y^2}}{y_{34}} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\left(\frac{l}{b}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2}, \quad (6.12)$$

де:  $\varphi_{12}$  і  $\varphi_{34}$  – РЕП між точками 1 і 2, 3 і 4 відповідно;  $\alpha = y_{34}$  – відстань між точками 3 і 4 на осі зразка, розташованими по одну сторону від тріщини поза зоною її впливу (рис. 6.9, а). Ця характеристика подана на рис. 6.9, b і являє собою характеристику логометричного РЕП-перетворювача.

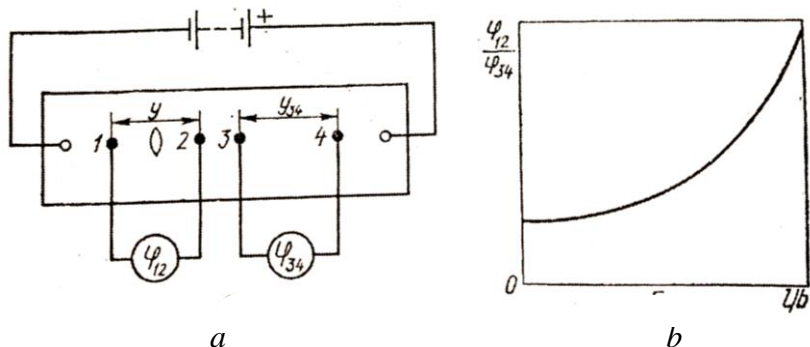
Чутливість  $S$  логометричного РЕП-перетворювача залежить від місця розташування потенційних контактів 1 і 2. Зміщення їх до однієї з вершин тріщини супроводжується значним підвищенням чутливості.

Чутливість РЕП-перетворювача можна значно підвищити, якщо на зразку (рис. 6.8), при максимальному зближенні контактів 1 і 2 ( $y=0$ ), сумістити контакти 2 і 4.

Аналіз поля потенціалів постійного струму свідчить, що в ділянці навколо тріщини можна розмістити потенційні контакти так, що РЕП між ними буде  $\varphi_{12} = 0$  за (будь-якої початкової довжини



тріщини  $l_0$ . Поле потенціалів на зразку можна зобразити з допомогою сімейства ліній рівного потенціалу. Ці еквіпотенціальні лінії для зразка без тріщини являють собою паралельні прямі, перпендикулярні осі зразка. Еквіпотенціальні лінії для плоского зразка з центральною тріщиною  $l=b/3$  побудовано на *рис. 6.10, а*.



*Рис.6.9.* Логометричний варіант методу РЕП (а) та тарувальна крива (b)

Цифри на лініях – значення потенціалу в відсотках від напруги на зразку. Аналіз таких картин для зразків з різноманітною довжиною тріщини показує, що поява тріщини викликає ступення ліній біля вершин і перед вершинами тріщини. Водночас збільшується відстань між еквіпотенціальними лініями в ділянках на осі зразка, згори і знизу тріщини. Цим і пояснюється слабка залежність чутливості від розташування контактів у цій ділянці і різке збільшення чутливості при  $x = l/2$ . Збурення, що вносить тріщина в поле потенціалів, займає зону, розмір якої по осі зразка  $h$  сумісний з абсолютною довжиною тріщини. При малих довжинах тріщини (*рис. 6.10, b*)

$$h-2l. \tag{6.13}$$

Досі як міру довжини тріщини розглядали напругу між двома певними точками зразка. Але ця напруга зумовлена зміною геометрії поля потенціалів у результаті зростання тріщини. Отже, мірою довжини тріщини може бути сама геометрія поля потенціалів, зокрема положення деякої вибраної еквіпотенціальної лінії.

Реалізувати такий метод вимірів можна так [154]. До зразка, як це показано на *рис.6.11, а*, в строго певних точках  $A$  і  $B$  підводять струм від деякого джерела. В ділянці тріщини фіксують точку  $M$ , в якій розташовують нерухомий вимірювальний контакт. Переміщуючи вздовж сторони зразка (або в іншому вибраному напрямі) цей контакт, знаходять таке його положення  $y_0$ , коли напруга  $U$  в місцях

$M$  і  $N$  відсутня, про що можуть свідчити, наприклад, нульові покази чутливого вольтметра. Отже, точки  $M$  і  $N$  знаходяться на одній еквіпотенціальній лінії.

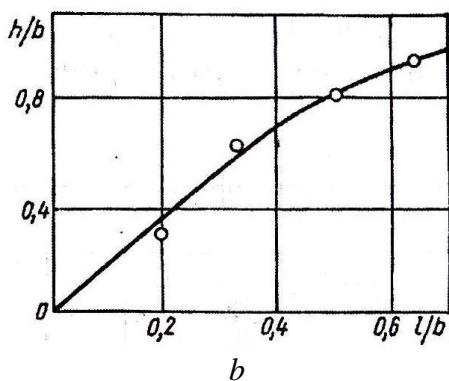
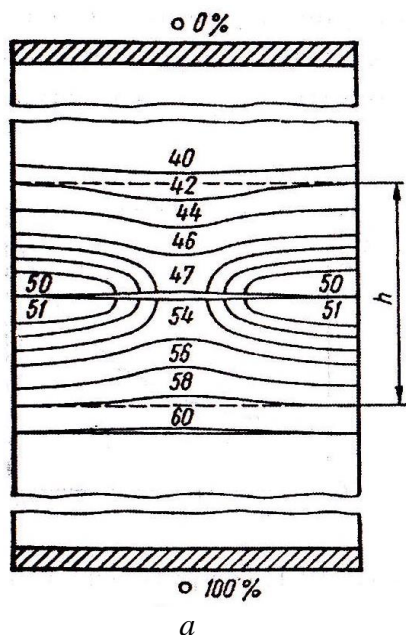


Рис. 6.10. Еквіпотенціальні лінії на зразку з центральною тріщиною –  $a$ , та розмір зони збурення –  $b$

Збільшення довжини тріщини на  $\Delta l$  призведе до зміни геометрії поля потенціалів і зміщення еквіпотенціальної лінії  $MN$ , що проходить через фіксовану точку  $M$ , в положення  $MN'$ . Вольтметр зафіксує напругу між точками  $M$  і  $N$ . Нове положення у потенційного контакту  $N'$  знаходимо, перемістивши точку  $N$  на таку відстань  $\Delta y$ , коли вольтметр знов показуватиме нуль. Завдяки цьому встановлюється однозначна залежність переміщення рухомого контакту  $\Delta y$  від приросту тріщини  $\Delta l$  (статична характеристика вимірювального РЕП-перетворювача  $\Delta l - \Delta y$  показана на рис.6.11, б).

Отримана характеристика не залежить ні від вигляду матеріалу зразка, ні від температури, а ні від сили струму, що протікає через зразок. Це пояснюється тим, що рівняння Лапласа, що описує розподіл потенціалів в тілі зі струмом, не містить ні температури, ні електропровідності матеріалу. Збільшення довжини тріщини “компенсується” переміщенням рухомого контакту. Для цієї “компенсації” не потрібно вимірювати ні силу струму, ні напругу. Вони тільки задіяні в процесі вимірів, забезпечуючи однозначне зіставлення  $\Delta l$  і  $\Delta y$ , точність якого тим вища, що більша чутливість нуль-індикатора, більша сила струму і питомий опір матеріалу зразка.

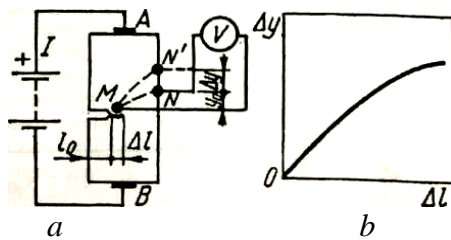


Рис.6.11. Схема вимірювання довжини тріщини РЕП-методом (а) та тарувальна крива (b)

Метод РЕП дає експериментатору більшу свободу вибору схеми вимірів не тільки щодо варіації положення потенційних контактів, але й щодо зміни розташування струмових контактів. Так, чутливість може значно збільшитися, якщо відстань між струмовими контактами буде менше ширини зразка, що зумовлено порівняльним ростом щільності струму в цій області. Однак, ще більші можливості відкриваються під час зміни напрямку струму відносно напрямку тріщини: замість звичайного, “перпендикулярного” тріщині пропускання струму, можна направити його “паралельно” лінії тріщини [26]. Такий “паралельний” метод РЕП володіє певними метрологічними, конструктивними і схемними особливостями, що в ряді випадків можуть зробити його більш прийнятним проти традиційного.

На рис.6.12 зіставлені статичні характеристики традиційного одностороннього і “паралельного” РЕП-перетворювачів. В першому випадку струмові контакти 3 і 4 розміщені на осі зразка на відстані 300 мм один від одного, потенційні 1 і 2 - по обидві сторони надрізу на відстані 2 мм від його вершини; в іншому - контакти 3, 4 розташовані аналогічно, а потенційні знаходяться на одній екіпотенційній лінії; контакт 1 залишений на тому самому місці, контакт 2 знаходиться на протилежній стороні на відстані 4 мм від лінії продовження надрізу. В третьому випадку струмові контакти знаходилися на бокових гранях зразка по лінії, на відстані 7 мм вище початкового надрізу, потенційні – на одній екіпотенційній лінії: контакт 2 – на лінії струмових контактів на відстані 20 мм від лівої надрізаної сторони, контакт 1 – на лівій стороні на 7 мм нижче надрізу.

Отже (рис.6.12), чутливість “паралельної” схеми вища, ніж традиційної (приблизно на 15 %) і односторонньої (в 2,5 раза). Крім того, завдяки “паралельній” схемі нема потреби ізолювати зразок від випробувальної машини, різко знижується щільність струму у вершині тріщини, а отже, виключається можливість впливу струму на зростання тріщини  $\varphi_{12}/\varphi_{34}$ .

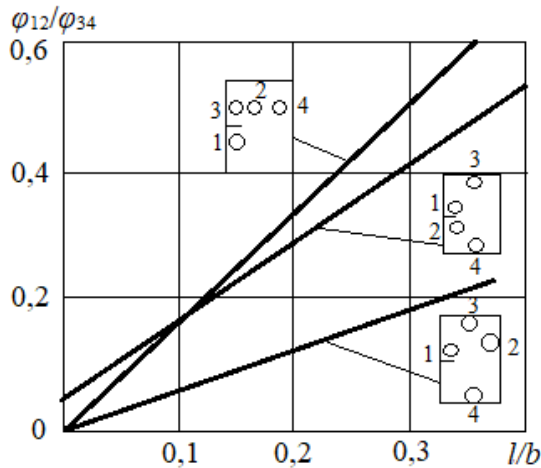


Рис. 6.12.. Характеристики “поздовжнього” і “поперечного” методів РЕП

Оскільки поле електричних потенціалів у результаті зростання тріщини перебудовується надто швидко, метод РЕП застосовують не тільки для вимірів повільних, докритичних, але й швидких, закритичних тріщин.

### 6.5. Метод акустичної емісії

Акустична емісія (АЕ) – це виникнення пружних коливань внаслідок локального звільнення пружної енергії навантажених твердих тіл під час пластичної деформації та руйнування [10, 11-13]. В пружні коливання перетворюється тільки частина енергії деформації тіла. Вони розповсюджуються в матеріалі зразка або елемента конструкції і можуть бути виявлені з допомогою високочутливих приймачів – п’єзоелектричних давачів.

Експериментально встановлено, що окремий сигнал АЕ являє собою сплеск високочастотних коливань в мегагерцевому діапазоні тривалістю декілька мікросекунд. Він виникає в результаті окремого акту пластичної деформації або руйнування. Якщо знехтувати пластичну деформацію, то кількість спалахів або імпульсів АЕ буде рівною кількості зруйнованих структурних складових матеріалу. Тоді метод АЕ можна розглядати як засіб природних сигнальних давачів, якими є структурні складові матеріалу. Тому найбільше значення набувають такі експериментально визначені величини, як повна кількість АЕ  $n(\tau)$  і частота  $f = dn/dt$  імпульсів. Справді, залишаючись у рамках цієї грубої моделі руйнування, для зразка товщиною  $t$  (рис.6.13) одержуємо:

$$l = \frac{n\rho^2}{t}; v = \frac{f\rho^2}{t}, \quad (6.14)$$

де:  $\rho$  – характерний розмір структурної складової;  $l$  – довжина тріщини;  $v$  – швидкість росту тріщини.

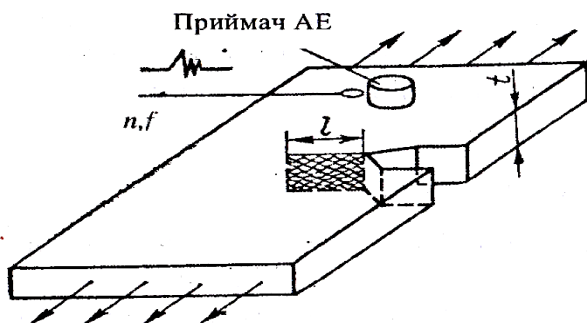


Рис. 6.13. Зразок з приймачем акустичної емісії

Отже, метод АЕ відноситься до засобів, оснований на взаємодії тріщини з пружним полем зразка. Зразок можна розглядати водночас як сукупність сигнальних давачів і як лінію зв'язку між ділянкою руйнування і приймачем, якою зі швидкістю звуку розповсюджується сигнал АЕ. Значення амплітуди коливань в АЕ-імпульсі значною мірою визначається властивостями матеріалу. Чутливість обладнання для досліджень АЕ-методом в основному залежить від характеристик приймача АЕ. Для приймання зсувних хвиль АЕ бажано жорстке з'єднання п'єзоелемента приймача зі зразком, але тут можливе тільки одноразове використання приймача.

Метод АЕ володіє важливими особливостями. Його можна віднести до безконтактних методів, зручних для дистанційних вимірів. Крім того, якщо на зразок поставити три або більше рознесених один відносно іншого приймачі АЕ, то одержаної інформації достатньо для визначення розташування джерела АЕ (місця руйнування). Нарешті, одну і ту ж апаратуру можна використати як для лабораторних досліджень, так і для натурних випробувань.

Структурна схема типової установи для досліджень руйнування методом АЕ подана на рис.6.14.

Сигнал від приймача АЕ надходить послідовно на чутливий підсилювач, розташований поблизу зразка, на фільтр для вилучення небажаних низькочастотних коливань і основний підсилювач. Після цього система ділиться на два канали: по одному сигнали надходять на магнітофон з метою нагромадження первинних даних і осцилограф для безпосереднього спостереження; по іншому сигнал іде на

дискримінатор, що пропускає тільки сигнали, що перевищують певний пороговий рівень, а далі - водночас на лічильник імпульсів і частотомір для визначення  $v$  і  $f$  відповідно. Записує ці величини як функції часу або якийсь інший параметр самописець.

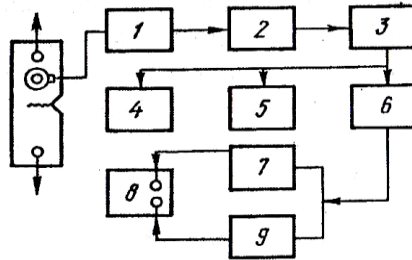


Рис. 6.14. Структурна схема установки для дослідження акустичної емісії: 1 – попередній підсилювач; 2 – фільтр нижніх частот; 3 – підсилювач; 4 – осцилограф; 5 – магнітофон; 6 – дискримінатор; 7 – частотомір; 8 – самописець; 9 – лічильник

Реальні матеріали мають складну багатофазну структуру, що утруднює регулярне руйнування, робить його залежним від взаємодії елементів структури. Наявність пластичної деформації, що передує руйнуванню і супроводжує зростання тріщини, приводить до появи додаткових "фонових" імпульсів ДЕ. Тому для реальних матеріалів однозначної залежності між довжиною тріщини  $l$  і  $n$ , а також між швидкістю  $v$  і частотою  $f$  не спостерігається, за винятком випадків, коли пластична деформація мала або протікає дуже повільно, а навантаження постійне або змінюється незначно.

Через сильну залежність інтенсивності АЕ від структури і механічних властивостей матеріалів АЕ-метод володіє слабкими метрологічними властивостями. Встановлену для одного матеріалу залежність між швидкістю зростання тріщини і частотою імпульсів АЕ не можна застосовувати [13,128] не тільки для вимірів на іншому матеріалі, але і для цього ж матеріалу після іншої термообробки. Тому він широко застосовується не стільки для досліджень кінетики тріщини, скільки для визначення моменту ініціювання руйнування [101], бо встановлено, що старт тріщини і навіть передстартовий етап супроводжуються початком інтенсивної АЕ.

## 6.6. Оптичні методи

Оптичні методи дослідження процесів руйнування – це сукупність методів, що базуються на взаємодії світла з тріщиною. Будь-яка оптична система використовується сумісно з приймачем світло-

вої енергії; оком, світлочутливим шаром, передавальною телевізійною камерою, катодом електрооптичного перетворювача і т. д. Каналом, на якому світло спрямовується від зразка до приймача, може бути система дзеркал й лінз, а також світлопровідники найрізноманітнішої конструкції, в тому числі й гнучкі (на основі волокнооптики). Часто тип приймача або каналу є відмінною рисою оптичної установки, що знаходить відображення в її назві, ускладнюючи класифікацію методів вимірювання довжини тріщин [127, 128].

Оптичні методи широко використовують під час досліджень руйнування. Для виміру довжини тріщини з уповільненим ростом часто застосовують катетометри - оптичні прилади для виміру віддалі між двома точками (наприклад, між вершиною тріщини й краєм зразка). Вони складаються зі штанги й зорової труби, що може пересуватися вздовж штанги. Відстань визначають за шкалою, що знаходиться на штанзі. Відлік здійснюють з точністю до декількох мікрометрів. Для вимірювання швидких тріщин оптичну систему доповнюють кінокамерою, що дозволить вимірювати довжину тріщин, які розповсюджуються зі швидкостями, що складають половину швидкості звуку в матеріалі зразка. Дослідження руйнування зразків з оптично чутливих матеріалів дозволяють розв'язувати низку принципівих задач, зокрема задачу про рівень зміїні поля напружень перед вершиною швидкої тріщини порівняно з полем нерухомої. Для цього оптичну систему вимірів суміщають з поляризаційно-оптичною установкою для дослідження напруженого стану способом фотопружності.

На *рис.6.15* подана схема такої установки [224] для дослідження руйнування дискового зразка 5 під дією гідравлічного удару та аналізу хвиль напружень, що виникають під час розповсюдження тріщини. Діаметр зразка з органічного скла 180 мм, товщина 18 мм, в надрізі є тріщина, що ініціювалася легкими ударами ножа. Зразок поміщений у поляризаційно-оптичну установку, що складається з конденсаторних лінз 2 й 10, поляризатора 3, чвертьхвильових пластинок 4 й аналізатора 9. За допомогою двох високовольтних випрямлячів 12 та 14 через опори  $R1$  й  $R3$  заряджаються конденсатори  $C1$  й  $C2$ , заряд яких контролюється вольтметрами  $K2$  й  $K3$ , а зарядна напруга – вольтметрами  $K1$  й  $K4$ . Енергію конденсатора  $C1$  використовують для імпульсного освітлення, а конденсатора  $C2$  – для навантаження зразка.

Після зарядження конденсаторів включається високошвидкісна кінокамера. Водночас високовольтний імпульс з трансформатора  $T3$  пробиває розрядник  $P$ . Відбувається розряд конденсатора через

струмопідводи 6 і дроту 11 діаметром 0,02 мм, який знаходиться в трубці 7, заповненій водою. Дріт руйнується, а ударна хвиля через стовп рідини передається на зразок 5. Водночас через трансформатор  $T_2$ , з лінії затримки на високовольтний трансформатор  $T_1$  надходить імпульс, що ініціює роботу потужного імпульсного джерела світла. Лінія затримки синхронізує спалах лампи з моментом входу ударної хвилі в область зразка. Тривалість спалаху 200...250 мкс.

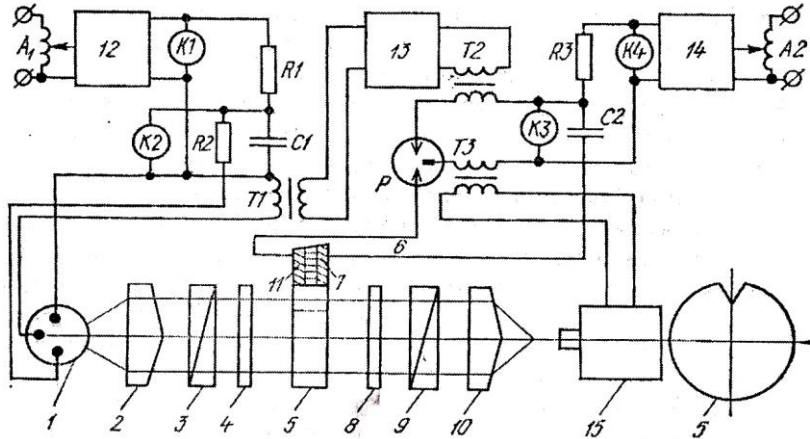


Рис. 6.15. Схема установки для оптичного дослідження росту тріщини

Камера знімає до 2,5 млн. кадрів за секунду при кількості кадрів 100...400. Це обумовлює необхідність жорсткої синхронізації початку руйнування та пуску Камери, що простіше здійснити під ударним навантаженням. Під статичним синхронізацію без спеціальних датчиків, що сигналізують про початок руйнування, провести практично неможливо.

Значні труднощі виникають з освітленням, бо час експозиції малий і необхідно застосовувати потужне джерело. В прозорих матеріалах тріщини добре проглядаються при косому освітленні, але в металевих це виконати дуже важко. Погасити блиск металу, що заважає, пробували травленням поверхні або напиленням сажі. В останньому випадку з'являється ще одна межа розділу метал – покриття й засіб вже не можна віднести до оптичних, оскільки досліджується руйнування шару сажі.

Оптичні установки найчастіше створюють за каскадним принципом, однак, є досвід виготовлення диференційних і сканувальних установок для виміру тріщин.

Оптичні методи об'єктивні, тому їх застосовують як еталонні



під час градування інших приладів й установок для вимірів. Однак стосовано до металів вони дають інформацію лише про розміри тріщин на поверхні зразка.

### 6.7. Метод вихрових струмів

Метод вихрових струмів (ВС), або електроіндуктивний засіб вимірів розмірів тріщини, ґрунтуються на взаємодії тріщини з замкнутими струмами, що виникають у зразку зі зміною магнітного поля, що його пронизує. Це магнітне поле створює котушка, зі змінним струмом, яка розташована на поверхні зразка так, що її вісь нормальна до зразка (накладна котушка), або розміщена навколо нього (прохідна котушка). Інтенсивність ВС залежить в першу чергу від електропровідності, магнітної проникливості і геометрії зразка, а також від відстані між котушкою і поверхнею зразка. Порушення суцільності металу тріщинами є перешкодою для ВС, тому вплив тріщини під котушкою аналогічний збільшенню електроопору матеріалу зразка. Крім того, тріщина відноситься до тих геометричних факторів, що виявляють вплив на інтенсивність ВС [127, 128].

Між ВС і збуджувальною котушкою існує взаємодія щодо зміни повного електричного опору котушки. Зворотний вплив ВС на котушку залежить як від величини, так і від геометрії ВС. Наприклад (рис.6.16), вихрові струми, збуджені накладною котушкою в ділянці, віддаленій від тріщини, мають вигляд концентричних кіл, у вершині тріщини їхня геометрія помітно спотворюється, а перетин тріщиною зони ВС зразка приводить до появи двох систем концентричних ВС. Ясно, що найбільше впливатиме тріщина, перпендикулярна лініям струму.



Рис.6.16. Ізолінії вихрових струмів

Зміну повного електричного опору котушки, пов'язану з появою під нею тріщини, можна зафіксувати з допомогою схеми, показаної на рис.6.17, а схема використання вихрових струмів показана на рис. 6.18.

Вона являє собою вимірювальний міст, плечами якого є вхідні обмотки трансформатора  $L1$  і  $L2$ , змінний резистор  $R$  і збуджувальна котушка  $L$  зі змінним конденсатором  $C$ . Як вимірювальний прилад (ВП) використовується ламповий вольтметр. Частота напруги живлення мосту 10.. .500 кГц. Балансування його проводять, коли

катушка  $L$  встановлена на бездефектний метал. Спочатку з допомогою конденсатора  $C$  досягають резонансу  $\omega L = 1 / \omega C$ , а після цього врівноважують міст резистором  $R$ . Поява тріщини під катушкою зумовлює розбалансування; значення якого зв'язане з довжиною тріщини. Для вимірів тріщин ВС-методом необхідно знати залежність напруги розбалансу від довжини тріщини в зоні чутливості катушки. Щоб її отримати аналітично, слід розв'язати надзвичайно складну задачу. Тому подібні залежності знаходять експериментально в процесі градування.

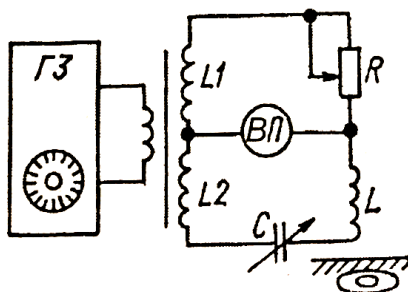


Рис. 6.17. Схема використання вихрових струмів:  $L1, L2$  – обмотки трансформатора;  $R$  – змінний резистор;  $L$  – збуджувальна Катушка;  $C$  – конденсатор змінний;  $ГЗ$  – генератор коливаний;  $ВП$  – вимірювальний прилад

Внаслідок скін-ефекту ВС концентруються поблизу поверхні зразка. Глибина їх проникнення зворотно пропорційна кореню квадратному з добутку частоти, магнітної проникливості й електропровідності. Тому найкращі результати одержують під час виміру поверхневих, нескрізних тріщин. ВС-метод вельми перспективний для дослідження зародження і початкових стадій розповсюдження втомних тріщин. Діапазон виміру розміру тріщини за нерухомого ВС-давача визначається зоною його чутливості, приблизно рівній діаметру збуджувальної катушки. Розширення діапазону вимірів можливо при використанні ВЧ-давача в компенсаційних приладах, що автоматично спостерігають ВС-давачем за вершиною тріщини, яка розповсюджується [121,155]. Схема такого приладу подана на рис. 6.18.

ВС-давач (ДВС) струмовихврового дефектоскопа ДНМ-15 (для алюмінієвих сплавів) або ДН-500 (для титанових) має можливість рухатися вздовж напрямку зростання тріщини по спеціальних напрямних, що встановлюють на зразку. З наближенням до вершини тріщини ДВС посилає сигнал  $V$ , що збільшується зі зменшення відстані між давачем і вершиною (рис. 6.18, б).

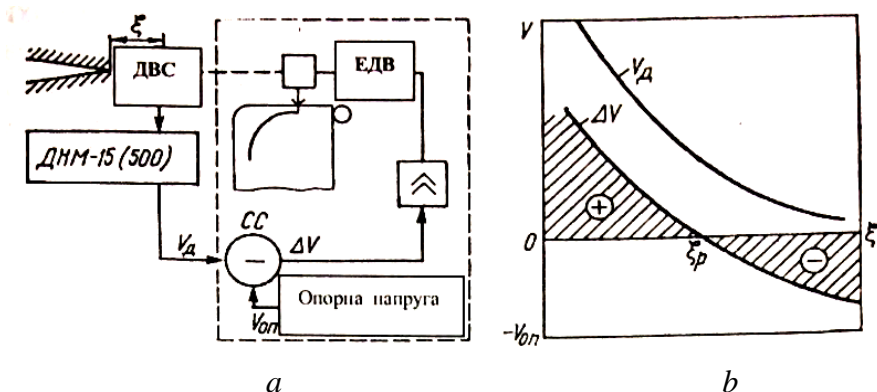


Рис. 6.18. Схема давача, що слідкує за кінчиком тріщини (а), та його характеристика (b)

Сигнал надходить на схему порівняння (СС), де він порівнюється з опорною напругою  $V_{оп}$ . Різниця сигналів  $\Delta V = V_d - V_{оп}$  посилюється і надходить на реверсивний двигун (ЕДВ), що зрушує ДВС. Якщо  $\Delta V > 0$ , то ДВС віддаляється від вершини тріщини, при  $\Delta V < 0$  він наближається до неї. При  $\xi = \xi_p$  сигнал розбалансу  $\Delta V = 0$ . Це та відстань, що автоматично підтримується постійною під час руху тріщини. Отже, запис переміщення давача відтворює водночас і рух вершини тріщини. Похибка вимірів довжини тріщини описаним методом не перевищує 0,3мм.

## 6.8. Магнітні методи

Магнітне поле у зразку або деталі з феромагнітного матеріалу за наявності в ньому неоднорідності у вигляді тріщини, розташованої нормально до напрямку поля, розсіюється на тріщині, через що поле в ділянці тріщини виходить із зразка (рис.6.19, а). Довжина “магнітного валика” над тріщиною рівна довжині тріщини на поверхні зразка [127, 128]. Таким чином, завдяки взаємодії тріщини з магнітним полем є можливість виміряти замість довжини тріщини довжину “магнітного валика”. За похилого стосовно напрямку магнітного поля розташування тріщини розсіювання поля, а отже, чутливість знижуються. Тріщини, паралельні силовим лініям магнітного поля, не взаємодіють з ним. Напруженість магнітного поля на ребрах тріщини тим вища, що вони гостріші (рис.6.19, b).

Для виявлення “магнітного валика” необхідно, щоб розсіяне тріщиною магнітне поле провзаємодіяло з магнітним матеріалом у вигляді порошку або магнітної головки, яка переміщається поверхнею зразка. У дефектоскопії для візуалізації “магнітного валика”

найчастіше застосовують тонкодисперсні магнітні порошки – як сухі, так і розчинені в рідині. Магнітний порошок притягається й утримується в місці виходу магнітного поля зі зразка, створюючи видиму порошкову фігуру, що за формою відтворює геометрію тріщини на поверхні зразків. Порошковий метод має певні переваги перед візуальними щодо тріщин зі з'єднаними берегами, які погано розрізняються навіть озброєним оком. Однак він застосовується лише для дуже повільних тріщин і незручний для виміру під час досліджень.

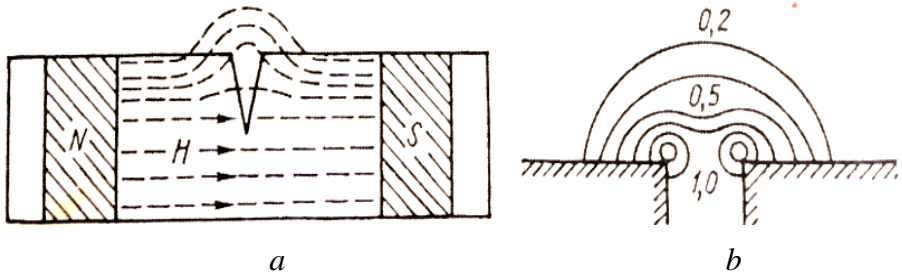


Рис. 6.19. Магнітні лінії в зразку (а) та біля ребер тріщини (b)

Тому певні переваги має метод ферографії [237], в основі якого лежить принцип запису на магнітну плівку тріщини методом, що використовується для магнітного запису звуку в магнітофонах, з тієї різницею, що магнітною головкою тут є зразок, що досліджується, а робочою щільною – тріщина. Запис здійснюється під час безпосереднього контакту магнітної плівки з поверхнею зразка в момент імпульсного намагнічування останнього. В результаті на плівку діє поле, локалізоване в місці розташування тріщини, і намагнічує тільки ту її ділянку, що контактує з тріщиною. Після зняття магнітного поля на плівці залишається прихований магнітний штрих, що повторить один до одного розмір і форму поверхневої тріщини. Це приховане зображення можна виявити з допомогою магнітного порошку.

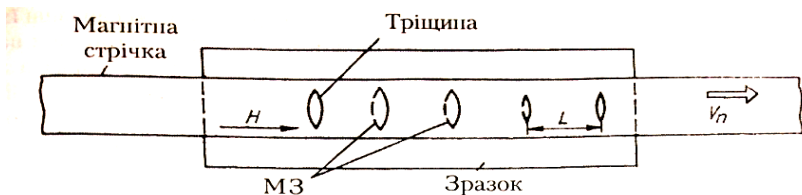


Рис. 6.20. Принципова схема методу ферографії

Як вже вказувалося, для більшої чутливості і чіткіших зображень тріщина повинна мати гострі ребра і контактувати з плівкою. Пластич-

на деформація викликає втягування, округлення ребер і відставання від плівки. Тому вирішальне значення має надійний контакт плівки з поверхнею зразка, який можна полегшити еластичною плівкою.

Для запису на магнітну плівку тріщин, що розповсюджуються, необхідно, щоб плівка переміщалася відносно зразка, наприклад, в напрямі, перпендикулярному зростанню тріщини (рис.6.20). Застосовуючи імпульсне намагнічування або циклічне перемагнічування зразка з відомою частотою  $f$ , одержуємо на плівці ряд послідовних прихованих магнітних зображень (МЗ) або “кадрів” зростаючої тріщини, що знаходяться один від одного на відстані  $L = v_n / f$ , де  $v_n$  – швидкість плівки.

Для одержання мітки МЗ тріщини, що поширюється, на плівці необхідно, щоб за час, рівний тривалості магнітного імпульсу  $\tau_m$ , переміщення плівки і збільшення тріщини можна було знехтувати. Відповідна умова має вигляд

$$\tau_m \ll 1. \tag{6.15}$$

Ефект взаємодії магнітного поля з такою тріщиною можна виявити з допомогою магнітних індукційних давачів, що являють собою котушки на П-подібних сердечниках (рис.6.21). У разі намагнічування зразка додатковим електромагнітом або постійним магнітом сердечник давача можна набрати з пластин трансформаторного заліза (рис.6.21, а). Однак сердечником може бути і постійний магніт (рис.6.21, б).

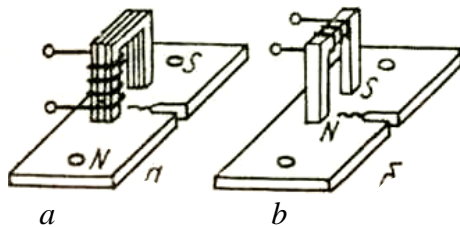


Рис.6.21. Індукційні давачі на електромагніті (а) та постійному магніті (б)

Під час проходження вершини тріщини між полюсами давача магнітний потік по сердечнику давача змінюється, що викликає появу в обмотці індукованої ЕРС, яка швидко зростає з рухом вершини між полюсами. Магнітні давачі такого типу можна використати як сигнальні. Розмістивши достатньо давачів на шляху розповсюдження тріщини й об'єднавши їх за послідовною схемою, можна виміряти середню швидкість тріщини на кожній ділянці між сусідніми давачами. Час руйнування  $\phi_p$  зразка з крихкого матеріалу, а

також середню швидкість тріщини на відстані, рівній ширині зразка, можна виміряти, якщо зафіксувати момент різкого прискорення тріщини і момент остаточного розподілу зразка на частини.

### 6.9. Метод сигнальних давачів

Він полягає в тому, що тріщина на своєму шляху по чергово впливає на сигнальні давачі (СД) (рис.6.22). В момент досягнення СД вершиною тріщини він дасть сигнал, що реєструється приладом, наприклад осцилографом, який дозволить визначити час його появи. Як СД можна використати тонкі провідники, що обриваються тріщиною, магнітні, струмовихрові, ультразвукові й інші давачі. Необхідно тільки, щоб зона чутливості СД була мала проти відстані між сусідніми СД. Бажано також, щоб сигнали СД охоплювали деякий характерний елемент, наприклад, крутий фронт або різкий максимум, з появою якого можна з більшою точністю вести відлік часу [127, 128].

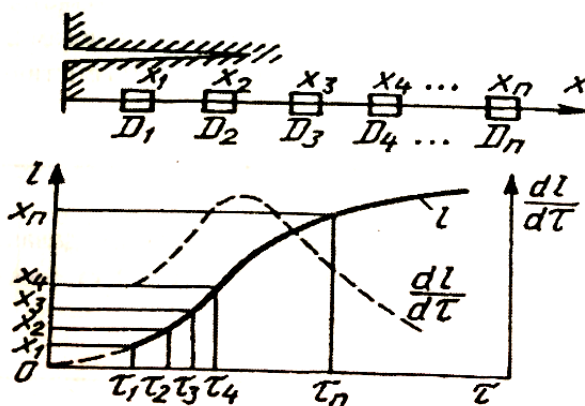


Рис.6.22. Метод реєстрації довжини тріщини сигнальними давачами

Визначивши час  $\tau$  появи сигналу від кожного СД і знаючи їхнє положення  $x$  на зразку, можна побудувати залежність довжини тріщини від часу, а також криву середньої швидкості тріщини на інтервалі між СД. Найпростіший спосіб побудови цих кривих подано на рис.6.23.

Точність вимірів методом СД значною мірою залежить від статичної характеристики застосовуваних давачів, яку в даному випадку слід розглядати не як лінію, а як поверхню:

$$S=S(y, z), \quad (6.16)$$

де:  $y$  – відстань вершини тріщини від центру СД, а  $z$  – зміщення на пряму зростання тріщини від нього (рис.6.23). Бажано, щоб не тільки

ки розміри цієї поверхні по осі були мінімальні, але й щоб функція  $S(y, z)$  слабо залежала від  $z$ . Тоді вигляд сигналу від СД залишиться таким самим, якщо тріщина відхилиться від напрямку свого розвитку і пройде повз центр давача. Такого характеристикою володіють сигнальні провідники, закріплені на поверхні зразка. Але у випадку їхнього використання для досліджень руйнування металів необхідна ще й ізолювальна підкладка. Неправильний вибір підкладки може привести до суттєвої невизначеності місцерозташування давача: крихкіша підкладка, що руйнується скоріше, ніж зразок, зумовить ефективне зміщення СД у напрямі від тріщини, занадто пластична – в напрямі до неї.

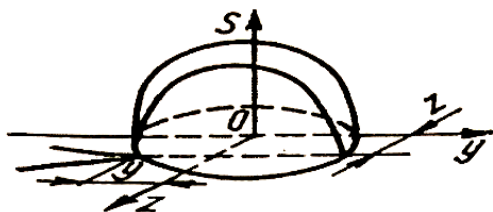


Рис.6.23. Характеристика сигнального давача

Струмовихрові та магнітні СД мають значну зону чутливості, що перевищує розміри ділянки їхнього контакту зі зразком. Чутливість магнітних давачів залежить також від швидкості тріщини.

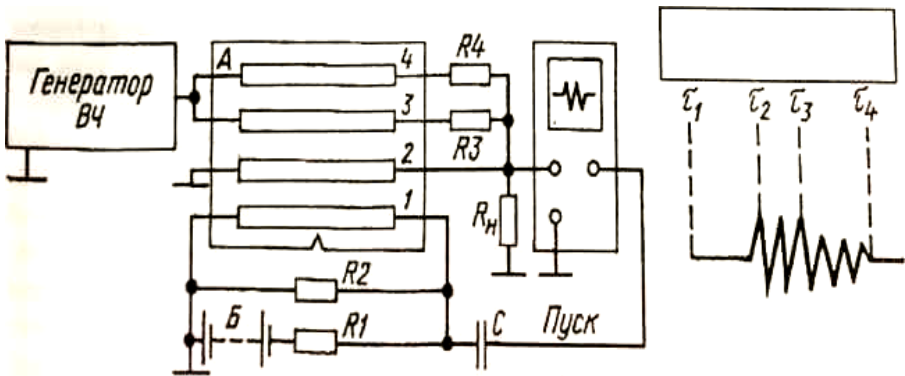
Найбільше застосовують СД у вигляді тонких провідників, що наносяться пайрїзіюманішими засобами на поверхню зразка (напилення металу у вакуумі, струмопровідний папір або фарба, тонкі дротики і т. д.). Розглянемо [90,167] одну з можливих вимірювальних багатоканальних схем з розривними СД (рис.6.24).

Зразок з органічного скла, що згинається зосередженою силою  $P$ , несе на собі чотири срібні стрічки шириною 0,5 мм, напилені у вакуумі через відповідний шаблон. Перша сигнальна стрічка розміщена безпосередньо над надрізом, інші ідуть слідом з відомим кроком  $L$ .

Перша смужка шунтує резистор  $R_2$ , що разом з резистором  $R_1$  складає навантаження джерела постійної напруги  $B$ . Друга стрічка шунтує резистор  $R_H$ , напруга з якого подається на електронно-променевий осцилограф. Напруга від генератора з частотою 1 МГц подається на стрічки 3 і 4.

Під час розриву стрічки 1 в момент часу  $\tau_1$  напруга в точці  $A$  стрибком змінюється від 0 до 10...20В і запускається разгортка осцилографа. Розрив стрічки 2 в момент  $\tau_2$  призводить до появи на вході осцилографа напруги з частотою 1 МГц. Розрив стрічки 3

зменшує амплітуду цієї напруги вдвічі ( $\tau_3$ ) і, нарешті, розрив стрічки 4 відключає генератор від осциллографа ( $\tau_4$ ). В результаті одержують осцилограму, показану праворуч на *рис.6.24*. За нею можна зміряти час між розривами сусідніх стрічок і визначити середню швидкість зростання тріщини на цьому шляху.



*Рис.6.24.* Схема установки з розривними давачами

Безсумнівною перевагою приладів з розривними СД є їхня простота і надійність. Основне, що перешкоджає їхньому широкому використанню – необхідність застосовувати ізолювальну підкладку між металевим зразком і давачем. В результаті з’являються принаймні дві межі розділу – між зразком і підкладкою та підкладкою і сигнальним провідником. Тобто сигнал з’являється після трьох розривів: матеріалу зразка під стрічкою, підкладки і самої стрічки. Це приводить до значних похибок виміру, особливо для пластичних матеріалів, в яких розділенню матеріалу передують значне розтягування і можливе відшарування підкладки від поверхні зразка.

## 6.10. Фрактографічні методи

Злам зруйнованого зразка або деталі містить в неявному, “зашифрованому”, вигляді інформацію про процеси руйнування, що привели до утворення його поверхні. Засоби вивчення руйнування, безпосередньо зв’язані з аналізом зламів або вимірами на них, називають фрактографічними. При цьому необхідно пам’ятати, що вигляд і будова зламу відображає не тільки структуру матеріалу, але й ту взаємодію тріщини з пружними хвилями, що виникають в результаті її зростання [127, 128].

Досвідчений дослідник за рядом ознак на зламі може визначити спосіб руйнування – крихке, пластичне або втомне. Як правило, крихкому руйнуванню, що протікає зі швидкістю –  $1000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , від-



повідает блискучий кристалічний злам, а пластичному, повільному - тьмянний, волокнистий. Для втомного зламу характерні втомні борізки або лінії. За зломом можна визначити місце початку (вогнище) руйнування, напрям зростання тріщини.

Одержання кількісної інформації про кінетику руйнування ускладнене через відсутність на злам "шкали часу". Однак в ряді випадків її можна відновити. Класичним прикладом цього є засіб ліній Вальнера (ЛВ), що виникають на поверхні зламу крихких матеріалів тину скла в результаті взаємодії фронту тріщини з пружною хвилею [237].

Встановлено, що крихка тріщина в склі розповсюджується в напрямі, перпендикулярному діючому в даний момент в її вершині максимальному головному розтягувальному напруженню. Якщо напруження змінюються в просторі і часі, то тріщина міняє свій напрям, "відображаючи" таким чином на поверхні зламу пружні процеси, що протікають в тілі. Але пружні хвилі розповсюджуються з відомою швидкістю, тому і з'являється можливість відновити "шкалу часу" для руйнування.

*Рис.6.25* ілюструє злам круглого стержня і пояснює процес виникнення ЛВ. Руйнування почалося в точці  $O$ , де на зламі звичайно проглядається вогнище руйнування у вигляді гладкої дзеркальної плями. Моментам часу  $\tau_2 - \tau_5$ , що проходять з рівними інтервалами, відповідають п'ять положень фронту тріщини (п'ять штрихових концентричних кіл). В момент часу  $\tau_1$  тріщина досягає точки  $A$ , в якій є поверхневий випадковий або штучний дефект. В момент досягнення тріщиною дефекту  $A$  відбувається різке вивільнення енергії пружної деформації, що сконцентрувалася біля поверхні дефекту, в результаті чого виникає пружний імпульс, що починає розповсюджуватися у вигляді пружної хвилі. Чотири суцільних концентричних кола відповідають положенням фронту поперечної пружної хвилі в моменти часу  $\tau_2 - \tau_5$ . Зустріч фронту тріщин з фронтом поперечної пружної хвилі проходить вздовж лінії  $ABCDE$ . На цій лінії змінюється напрям максимального розтягувального напруження, тому на деякий час, відповідно тривалості пружного імпульсу, міняється напрям руйнування і на поверхні зламу утворюється сходинка - ЛВ.

ЛВ завжди мають вигляд кривих, увігнутих з боку фокуса зламу  $O$ , що полегшує визначення його місця розташування. Вихід ЛВ на поверхню зразка, найближче до точки  $O$ , фіксує місце знаходження дефекту  $A$ .

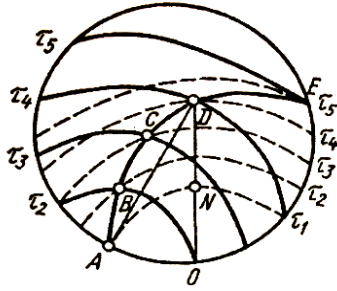


Рис.6.25. Схема утворення ліній Вальнера

Швидкість тріщини до прямої, що з'єднує фокус злам  $O$  з точкою на ЛВ, наприклад точкою  $O$  – можна знайти з таких міркувань.

Очевидно, що тріщина мине шлях, рівний відрізку  $ND$  за той же час, за який пружна хвиля мине шлях  $AD$ . Якщо швидкість тріщини  $v$ , має швидкість поперечної хвилі  $c_2$ , то

$$\frac{DN}{v} = \frac{OD - OA}{v} = \frac{AD}{c_2}, \quad (6.17)$$

$$v = c_2 \left( \frac{AD}{OD - OA} \right), \quad (6.18)$$

тому що  $ON = OA$  і  $DN = OD - OA$ . Отже, для визначення середньої швидкості на відрізку  $ND$ , необхідно знати швидкість пружної хвилі  $c_2$  і виміряти на зламі довжину сторін трикутника  $OAD$ .

Якщо під час розповсюдження тріщини додатково вплинути на процес пружними коливаннями з частотою  $f$ , то поверхня злам буде промодульована з довжиною хвилі модуляції  $\lambda_\mu = v/f$ .

Можливість модуляції тріщин пружною хвилею вперше показана Керкхофом, який використав взаємодію ультразвукової пружної хвилі з тріщиною, відбиту на поверхні злам, для визначення її швидкості (рис.6.26).

Скляна пластина довжиною 20 см і перетином 1 см<sup>2</sup> розтягувалася навантаженням  $P$ . На верхній грані пластини є випромінювач поперечних УЗ-хвиль, що розповсюджуються вздовж осі зразка (кут  $\alpha = 90^\circ$ ). Площина поляризації хвиль збігається з площиною креслення. Напрями максимального розтягувального напруження періодично змінюються з частотою  $f$ , що близька 5 МГц. В результаті злам виявляється промодульований на глибину до 1 мкм. При швидкості зростання тріщини 1000 м с<sup>-1</sup> довжина хвилі модуляції (відстань між горбами на злам) була біля 0,2 мм і добре розрізнялася навіть незброєним оком.

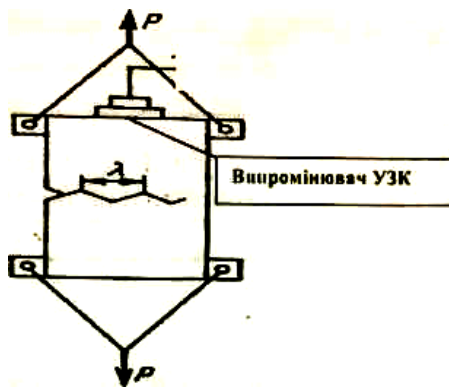


Рис. 6.26. Схема установки для модуляції поверхні тріщини в склі

Описаним методом виміряні швидкості руйнування неорганічного і органічного скла в діапазоні від 100 до 2700 м·с<sup>-1</sup>. Очевидно, що метод УЗ-модуляції універсальніший, ніж ЛВ-метод, бо вплив на тріщину має регулярний, а не випадковий характер і його може регулювати експериментатор. Його не використовують для металевих матеріалів, де зростання тріщин супроводжується енергомісткими процесами пластичної деформації. Крім того, конструкційні матеріали володіють складною структурою, що перешкоджає макроскопічній модуляції тріщин (або утворенню ЛВ).

Модуляція поверхні зламу може відбуватися також внаслідок циклічної зміни зовнішнього навантаження, яке діє на зразок. Фрактографічний аналіз втомних зламів показав, що на деяких їх ділянках існують борізки, що створюють періодичну структуру з кроком порядку 1 мкм. Вони характерні для першої і другої стадій втомного руйнування.

Встановлено, що на першій стадії ширина борізки (крок) більша за швидкість тріщини, на наступній стадії вона збігається зі швидкістю тріщини, а після цього стає меншою. Водночас втомні борізки достатньо точно відтворюють швидкість руйнування (крок на один цикл) в мікрообластях, і ця оцінка не може збігатися зі швидкістю макроскопічної втомної тріщини через нерегулярне просування її фронту тріщини на окремих ділянках.

Зміна режиму втомного навантаження, наприклад, зниження розмаху циклічного навантаження, зумовлює зміну швидкості втомної тріщини, що знаходить відображення на макроскопічних втомних лініях. Багаторазова зміна режиму приводить до появи на поверхні зламу цілого ряду цих ліній. Виміри відстані між лініями  $\Delta l$

за відомої кількості циклів між змінами режиму навантаження  $\Delta N$  дадуть середню швидкість втомної тріщини  $\Delta l / \Delta N$  на цій ділянці. Втомні макроскопічні лінії використовуються також для градування приладів і установок для виміру довжини тріщини.

### **6.11.Спосіб вимірювання розкриття та довжини тріщин у залізобетонних конструкціях**

Тріщини в розтягнутих зонах можуть викликати катастрофічне руйнування залізобетонних конструкцій і споруд. Нормативні вимоги до тріщипостійкості залізобетонних конструкцій регламентують гранично допустимі величини розкриття тріщин  $[W_{crc}]$ . Гранично допустимі навантаження, ресурс експлуатації під постійними навантаженнями визначають, порівнюючи розрахункові значення розкриття з допустимою величиною  $[W_{crc}]$ .

Для одержання розрахункових даних або профілактичного контролю робочого стану залізобетонного елемента конструкції потрібно застосовувати трудомісткі роботи з вимірювання параметрів тріщин безпосередньо на поверхні елемента. Вони значно ускладнюються за обмеженого доступу до досліджуваної, поверхні, дії сильно агресивного середовища, радіоактивного випромінення, тому створення пристроїв дистанційного контролю за розвитком тріщин викликає значний практичний інтерес [127, 128].

Відомі способи дистанційного дослідження кінетики тріщин у металах, оснований на принципі створення в дослідному зразку або натурній конструкції електромагнітного поля вихрових струмів із наступною реєстрацією зміни його параметрів внаслідок розвитку тріщини [103, 121]. Такі способи характеризуються високою точністю вимірювань.

Такий самий принцип покладено в основу пропонованого пристрою та способу вимірювання розкриття і довжини тріщин у залізобетонних конструкціях та спорудах.

Але на бетонній поверхні неможливо створити електромагнітне поле, тому рекомендують на поверхню конструкції наносити струмопровідний шар напилюванням або наклеюванням фольги. Пристрій застосували [103, 121] на зразку прямокутного профілю розмірами 100x100x400 мм (рис. 6.27), на якому досліджували ріст і розкриття попередньо створеної тріщини у розтягнутій зоні під час точкового згину. Зразок армований одним стержнем арматури  $d = 8$  мм зі сталі А-II, товщина захисного шару бетону 15 мм, клас бетону С20. Тріщина являє собою наскрізний надріз довжиною 10 мм, кут біля вершини надрізу  $60^\circ$ , радіус заокруглення 0,1 мм. На бокову

поверхню відшліфованого зразка наклеїли струмопровідний шар – алюмінієву фольгу товщиною 5 мкм. На струмопровідний шар на віддалі 5 мм від площини тріщини встановили пару котушок індуктивності  $L_1$  і  $L_2$ . Біля гирла тріщини таким самим способом встановили котушки індуктивності  $L_3$  і  $L_4$ .

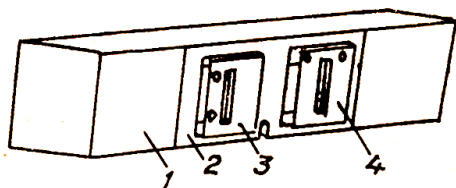


Рис. 6.27. Залізобетонний зразок з надрізом і котушками вимірювання довжини тріщини: 1 – бетонна поверхня зразка; 2 – струмопровідний шар; 3 – передавальна котушка  $L_1$ ; 4 – приймальна котушка  $L_2$

Пристрій (рис. 6.28) містить високоякісні генератори  $G_1$  і  $G_2$  типу Г3118, передавальні (2 тис. витків мідного дроту діаметром 0,07 мм) і приймальні (10 тис. витків мідного дроту 0,07 мм) котушки індуктивності  $L_1$  і  $L_3$ ,  $L_2$  і  $L_4$ , підсилювач сигналу з коефіцієнтом підсилення 11,5, фільтр і реєструвальний пристрій – вольтметр Щ4300.

Від генератора  $G_1$  сигнал певної частоти 8 кГц і амплітуди подається на котушку індуктивності  $L_1$ , яка збуджує на струмопровідній поверхні зразка вихрові струми з електромагнітним полем. Котушкою індуктивності  $L_2$  сигнал сприймається і через підсилювач  $P$  (стрічковий) і фільтр  $\Phi$  подається на реєструвальний пристрій. З ростом довжини тріщини або її зародженням внаслідок розривів струмопровідного шару (фольги) електромагнітне поле між котушками  $L_1$  і  $L_2$  змінюється, що відображається на амплітуді сигналу, який сприймається індуктивністю  $L_2$  і, як наслідок, на показах реєструвального пристрою  $PP_1$ .

Підсилювач введений у схему для підвищення чутливості, що за відсутності перешкод близько розташованої арматури дозволяє значно збільшити відносну зміну величини контрольованого сигналу. Стрічковий фільтр  $\phi$  призначений для виділення корисного на фоні можливих перешкод і являє собою активний фільтр Чебишова.

Розшифровуючи сигнали, які надходять у  $PP_1$ , можна визначити довжину тріщини у зразку під час її розвитку.

Зміна покриття тріщини в гирлі, яке викликає зміну віддалі між котушками  $L_2$  і  $L_4$ , фіксується пристроєм  $PP_2$ , куди поступає сигнал з приймальної котушки  $L_4$ . При цьому у котушці  $L_3$  генерується постійне електричне поле. У разі вимірювання розкриття тріщини немає

потреби застосовувати підсилювач і фільтр, достатньо згенерувати у передавальній котушці потужне електромагнітне поле.

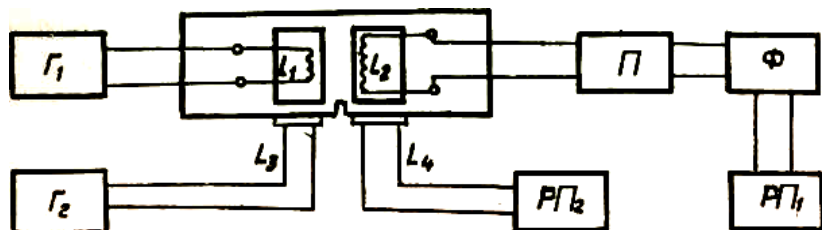


Рис. 6.28. Схема підключення приладів до пристрою вимірювання довжини і розкриття тріщини

Безпосередньо перед випробуванням партії із десяти зразків катетометром таруються реєструвальні пристрої, якими були вольтметри. Чотири зразки випробовували без використання пристрою і стільки ж з ним. Приріст довжини тріщини 25 мм, а розкриття в гирлі до 0,8 мм. У зразках без пристрою розкриття і довжина тріщини вимірювались катетометром. Також випробовували зразки тільки з пристроєм вимірювання довжини і розкриття тріщини для визначення взаємного впливу електромагнітних полів котушок  $L_1$  і  $L_3$  на покази приладу.

Відзначено добру кореляцію між даними, одержаними приладами і реєструвальними пристроями  $PP_1$  і  $PP_2$ . Крім того, прилади вимірювання довжини і розкриття тріщини за відповідного підбору передавальних котушок індуктивності не створюють взаємних перешкод. У результаті згину зразків встановлено, що пристрій вимірювання довжини тріщини ефективно фіксує момент (навантаження) появи початкових тріщин при використанні тонкої фольги або напилення металом.

Перевагою запропонованого пристрою є висока точність вимірювання параметрів тріщин, можливість дистанційного спостереження за їх розвитком у залізобетонних конструкціях і спорудах, розташування реєструвального пристрою на значній віддалі від об'єкта досліджень, а також перспектива автоматизації спостережень з використанням самописців і ПК, що дає можливість рекомендувати його до застосування, особливо для відповідальних залізобетонних конструкцій мостів і споруд.

## 6.12. Висновки до розділу 6

Базуючись на результатах виконаних експериментальних досліджень у лабораторіях та натурних довготривалих випробувань і

півнатурних залізобетонних конструкцій при різних видах і рівнях навантаження, та аналізу науково-дослідних джерел експериментальної механіки руйнування, яка сформулювала низку експериментальних методів описаних в цьому розділі і аналізу результатів досліджень авторів можна запропонувати такі висновки:

1. На основі аналізу науково-технічних джерел сформульовано основні поняття експериментальної механіки руйнування. Зокрема, що досліджує ЕМР – властивості конструкційних матеріалів їх опір руйнуванню, встановлення залежності між навантаженням часом і параметрами руйнування, довжиною тріщини і її розвиток та іншими параметрами і становить експериментальну задачу механіки руйнування.

2. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено декілька методів які базуються на фізичних законах, які описують напружено-деформований стан в околі тріщини та апробовані на різних матеріалах. Зокрема, такі методи: метод пружної податливості, ультразвуковий метод, метод різниці електричних потенціалів, метод акустичної емісії і інші, які дають надійні результати при оцінці міцності та тріщиностійкості конструкційних матеріалів і елементів конструкцій.

3. При визначенні критеріїв механіки руйнування конструкційних матеріалів та ростом тріщини під навантаженням застосовують і оптичні методи, схему установки для оптичного дослідження росту тріщини описано у цьому розділі. Застосовують також і метод вихрових струмів за допомогою ізоляцій та використовуючи скін-ефект ВС концентрується поблизу поверхні зразка. Використовують також і магнітні методи для яких розроблено методіку досліджень і метод сигнальних давачів. Зокрема, фрактографічними методами досліджують поверхні зламу зразка.

4. Розроблено спосіб вимірювання розкриття та довжину тріщини у залізобетонних конструкціях. Зокрема, описано методіку ілюструючи її на залізобетонному зразку з надрізом і потужними вимірюваннями довжини тріщини та наведено схему підключення приладів до пристрою вимірювання довжини тріщини та наведено схему підключення приладів до пристрою вимірювання довжини і розкриття тріщини. Ця методіка пройшла апробацією авторами і показала добрі результати.

## 7. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ, ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА ІНШИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 7.1. Зразки та способи їх виготовлення

Як і в усіх кам'яних матеріалах, межа міцності бетону при стиску значно (у 8...12 разів) вища, ніж при розтягуванні та згині. Тому в будівельних конструкціях бетон, як правило, працює на стиск. Коли говорять про міцність бетону, мають на увазі його міцність на стиск і тому основним показником якості бетону є його клас за міцністю на стиск. Класом бетону за міцністю на осьовий тиск  $C$  (МПа) називається тимчасовий опір стиску бетонних кубів з розміром ребра 150 мм, випробуваних у відповідності зі стандартом через 28 діб зберігання при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  з врахуванням статистичної мінливості міцності [127, 128].

Стандартний розмір куба для визначення так званої кубикової міцності бетону – 150x150x150 мм. При інших розмірах ребра визначену при випробуваннях міцність домножують на перевідний коефіцієнт: для ребра 70,7 мм – 0,85; для 100 мм – 0,91; для 200 мм – 1,05; для 300 мм – 1,1.

Форми для зразків виготовлюють, як правило, із металу. Відхилення внутрішніх розмірів форм не повинно перевищувати 1%.

Контрольні зразки необхідно зберігати в камері при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  та відносній вологості повітря не менше 90%.

Для випробування зразки – куби – встановлюють однією із бокових граней на опорну плиту преса і центрують за допомогою спеціального шаблону чи за рисками на опорній плиті. Навантаження на зразок при випробуванні повинно наростати рівномірно зі швидкістю 0,06–0,1 кН/с [39].

Границя міцності стиску куба визначається за формулою:

$$R_m = \frac{N_u}{A_b}, \quad (7.1)$$

де:  $N_u$  – руйнівна сила;  $A_b$  – площа грані куба.

Щоб оцінити мінливість міцності і забезпечити її гарантоване для заданого класу бетону значення, використовують теорію ймовірностей.

Гарантована міцність заданого нормами класу бетону

$$C = 0,78f_c, \quad (7.2)$$

що відповідає забезпеченості (довірчій імовірності) 0,95.

Краще характеризує міцність бетону при одновісному стиску так звана призмova міцність бетону, яку використовують при розрахунках бетонних і залізобетонних конструкцій.

При механічному (руйнівному) методі визначення призмovoї



міцності бетону форма зразка повинна забезпечувати створення під час випробувань умов одноосового стиску в можливо більшій частині зразка. Тому міцнісні та деформаційні характеристики при одновісному короткочасному статичному стиску рекомендується вимірювати на зразках у вигляді прямих циліндрів або прямокутних паралелепіпедів (призм) з рівними сторонами основи.

Співвідношення між основними лінійними розмірами зразка - його висотою ( $h$ ) і діаметром ( $d$ ) або сторонами основи: меншої ( $a$ ) і більшої ( $b$ ) – залежить від методу вимірювань механічних характеристик. За механічного методу співвідношення між  $h$  і  $d(a)$  встановлюють, виходячи з наступних умов: під час випробувань у середній частині зразка повинна бути зона, напружений стан якої можна вважати однорідним; розмір її повинен дозволяти вимірювати деформаційні характеристики матеріалу; при дослідженні зразків різних абсолютних розмірів співвідношення між загальним обсягом зразка і обсягом його середньої зони повинно бути завжди однаковим.

Теоретичними й експериментальними дослідженнями встановлено, що у зразку біля торців є зони висотою  $(0,5 - 1,0) d(a)$ , що перебувають в умовах неоднорідного напруженого стану, викликаного опорним тертям і деформацією опорних плит випробувальної машини. Тому для одержання порівняльних результатів рекомендується приймати відношення  $h/d$  ( $h/a$ ), рівне 3...4.

Мінімальний діаметр (сторону) основи вибирають з умови, щоб напружено-деформований стан у перетині можна було б вважати однорідним для матеріалу даної структури. Ця умова виконуватиметься, якщо відношення між середньозваженим лінійним розміром неоднорідності структури матеріалу ( $d_3$ ) і основою зразка ( $d$  або  $a$ ) менше деякого значення.

У звичайних важких і легких бетонах за неоднорідність слід приймати зерна грубого наповнювача, а в пористих – великі пори. Виходячи з цієї передумови і враховуючи деякі положення математичної статистики та результати експериментальних досліджень, відношення  $d_3/d$  ( $d_3/a$ ) не повинно перевищувати 1/5.

Максимальний діаметр (сторона) основи залежить від мети експерименту і можливостей випробувального обладнання (розмірів і потужності машин, їхньої точності і точності приладів для виміру деформацій і т. д.).

Номінальний розмір поперечного перерізу зразків рекомендується вибирати, виходячи з розмірів наявного обладнання для їхнього виготовлення (форми, розпилювальні верстати, вібростоли і

т. ін) і зручності проведення розрахунку під час обробки даних експерименту. В останньому випадку бажано оперувати з цілими і кратними значеннями площ поперечного перерізу. Зважаючи на розміри зразків-кубів, що регламентуються ГОСТ 10180-90 "Бетон важкий. Методи визначення міцності", слід застосовувати зразки-призми з поперечним перетином 70,7x70,7; 100x100; 150x150 і 200x200 мм і зразки-циліндри з рівними або близькими значеннями площ поперечного перерізу.

Кількість зразків-близнят в партії ( $n$ ) встановлюється за фактичними значеннями параметрів статистичного розподілу тієї або іншої механічної характеристики, яка в даному експерименті прийнята за основну (міцність, модуль деформативності, коефіцієнт поперечних деформацій, межа мікротріщиноутворення і т. д.).

Опираючись на нагромаджений досвід, рекомендують орієнтовно досліджувати не менше шести зразків у партії.

Методика виготовлення залежить від мети експерименту та виду бетону, механічні характеристики якого повинні бути виміряні на даних зразках. Зразки зі звичайного важкого і легкого бетонів, а також щільного силікатного, як правило, виготовляють у спеціальних формах, якщо тільки методикою експерименту не передбачений їхній відбір (випилювання) з конструкції або споруди. Зразки з пористих бетонів висвердлюють (циліндри) або випилюють (призми) з конструкцій чи зі спеціально виготовлених для цього блоків. Конструкція і матеріал форм для зразків повинні забезпечувати: виготовлення зразків з заданими геометричними характеристиками; додержання технології; розпалубку зразків без будь-яких їхніх механічних пошкоджень; зручність експлуатації. Під час конструювання і виготовлення форм ці вимоги дотримуватимуться при виконанні інших.

Форми слід виробляти з твердих, вологостійких матеріалів (металів, пластмас і т. д.) відповідно з вимогами ГОСТ 10180-90. Внутрішні поверхні необхідно якісно обробити. Відхилення торцевих поверхонь від площини не повинно перевищувати 0,05 мм, а їх непаралельність – 0,1 та 100 мм, відхилення від прямого кута між боковою гранню і торцем 18. Інші внутрішні розміри повинні бути виконані з похибкою  $\pm 1\%$ .

Загальна конструкція форм має бути достатньо жорсткою, щоб не деформуватися під час виготовлення зразків. З'єднання елементів форм повинні бути щільними, що виключають втрати води і цементного молока при формуванні. Замкові з'єднання не по-

винні самовільно розкриватися в процесі віброущільнення бетонної суміші. Форми мають бути роз'ємними, а їхня конструкція повинна дозволяти плавно без ударів і струсів розкривати всі рухомі з'єднання. При цьому під час розпалубки на зразок не повинні передаватися будь-які зусилля. Конструкція форм має передбачати можливість їхнього кріплення до вібростолу й інших стаціонарних ущільнювальних приладів. На зовнішніх частинах форм повинно бути якомога менше місця, в яких накопичується бетонна суміш. Вони мають бути зручні в чищенні мінімальної маси.

Конструктивні рішення, що забезпечують виконання умов, перерахованих в попередньому пункті, зводяться до таких.

Підвищення загальної жорсткості форм і зменшення кількості рухомих з'єднань, а відтак довжину ущільнень можна досягнути завдяки виконанню форм з небагатьма з'єднаннями.

Збільшити щільність з'єднань можна гумовим шнуром, що вкладається в спеціальні заглиблення, глибина яких дещо менша, а ширина рівна його діаметру. Замкові з'єднання у вигляді гвинтових домкратів дозволяють не тільки щільно стягувати елементи форм під час складання, але й плавно розкривати їх, переборюючи зусилля адгезії бетону до поверхні форм. Плавного розкриття і точного з'єднання форм можна досягти також за допомогою спеціальних приливів на їхніх елементах. При складанні приливи фіксують положення елементів, що збираються, а під час розпалубки є упорами для спеціальних монтажних пристроїв.

Конструкція форм може передбачати виготовлення зразків як у вертикальному, так і в горизонтальному положеннях. Зразки-циліндри рекомендується виробляти у вертикальних формах. Для забезпечення належної якості опорних торцевих поверхонь форми повинні мати кришки-пуансони.

Зразки-призми можна виготовляти в горизонтальному положенні в стандартних формах, призначених для одночасного виготовлення трьох зразків-кубів розміром 70,7x70,7x70,7 і 100x100x100 мм, з яких попередньо виймають перегородки, або в формах для зразків-балок розміром 150x150x550 мм.

Перед виготовленням зразків внутрішню поверхню зібраних форм слід ретельно змастити тонким шаром мастила, що перешкоджає прилипанню бетону. Під час термообробки мастило не повинно пригорати і через це погіршувати умови розпалубки, а також викликати корозію поверхні бетону.

Одержати однакове ущільнення бетонної суміші в партії зраз-

ків-близнят і порівнювані механічні характеристики серії зразків – найважливіша вимога під час виготовлення. Це зумовлене тим, що за інших рівних умов (склад, марка цементу і наповнювача, вологість, вік, умови випробування і т. ін.) міцність бетону однозначно зв'язана з кількістю втягнутого в бетонну суміш повітря.

Ступінь ущільнення бетонної суміші характеризується коефіцієнтом ущільнення  $k_t$  – відношенням об'ємної маси ущільненого бетону до об'ємної маси бетону без повітря. Коефіцієнт  $k$  слід визначати безпосередньо після ущільнення бетонної суміші. Коефіцієнт ущільнення слід задавати залежно від мети експерименту. Якщо зразки контрольні відносно бетону будь-якої конструкції, то  $k$  приймається таким, яким він повинен бути в конструкції загалом або в окремих її елементах. В інших випадках бажано, щоб він становив 0,98...0,99. Якщо заданий коефіцієнт ущільнення не вдалося отримати, то залежно від поставленої мети слід змінити ті чи інші технологічні параметри (склад бетону, гранулометричний склад великого наповнювача, метод ущільнення і т. ін.), або зменшити  $k$ .

Зразки з заданим коефіцієнтом ущільнення можна виготовляти способами, які ґрунтуються на контролі ступеня ущільнення або за обсягом (масі) бетонної суміші, що вкладається, або тривалістю ущільнення (якщо виготовлення здійснюється за допомогою вібрування або іншими аналогічними шляхами).

У першому випадку для кожного зразка залежно від прийнятого  $k$  і фактичного обсягу форми попередньо зважують необхідну кількість бетонної суміші. Тривалість ущільнення визначається часом, необхідним для вкладання усього зваженого обсягу бетонної суміші у форму.

У другому випадку заздалегідь дослідним шляхом встановлюють тривалість, необхідну для ущільнення бетонної суміші у формі даного розміру до прийнятого  $k$ . Слід враховувати, що тривалість ущільнення буде неоднаковою при виготовленні зразків різного розміру, оскільки, що вище шар бетонної суміші, то важче усунути з нього під час перемішування повітря. Цей спосіб використовують тільки при виготовленні зразків у горизонтальному положенні.

Реальний коефіцієнт ущільнення бетонної суміші в даному зразку визначають на підставі зважування (відразу після закінчення ущільнення) форми з наповненою бетонною сумішшю. Перед зважуванням з зовнішньої поверхні форми треба ретельно усунути залишки бетонної суміші. Для необхідних розрахунків з точністю, що вимагається, масу форми слід заздалегідь визначити з похибкою  $\pm 1\text{г}$ , а її внутрішні розміри – з похибкою  $\pm 0,1\%$ .

Реальне значення коефіцієнта  $k$  необхідне, оскільки через деяке відхилення фактичних розмірів форм від номінальних і ряд інших факторів, які важко врахувати, можлива деяка розбіжність фактичних значень коефіцієнтів ущільнення від заданого.

Методи ущільнення бетонної суміші мають забезпечувати її рівномірний розподіл по зразку і однаковий коефіцієнт ущільнення. Для досягнення цих характеристик рекомендується застосовувати пошарове укладання. Товщина кожного шару не повинна перевищувати характерний лінійний розмір (діаметр або сторону) основи зразка. Незалежно від застосовуваного методу ущільнення (особливо при використанні жорстких бетонних сумішей) рекомендується штикувати кожний шар згідно з ГОСТ 10180-90.

Під час виготовлення контрольних зразків до конструкцій (споруд) бажано ущільнювати бетонну суміш з тими самими параметрами, що й при укладанні в конструкцію (частота, амплітуда, напрям коливань і т. д.).

Для лабораторних досліджень метод ущільнення рекомендується вибирати залежно від жорсткості (рухливості) бетонної суміші. При застосуванні жорстких (осадки конуса 0) і рухомих (осадки конуса менше 12 см) бетонних сумішей їх слід ущільнювати па вібростолї з нормальним до його поверхні напрямом коливань з частотою 2800...3000 за 1 хв і амплітудою 0,35 мм під навантаженням.

Для дуже рухомих бетонних сумішей (осадки конуса більше 12 см) ущільнювати слід вручну – штикуванням згідно з п. 1.2. 11 ГОСТ 10180-90.

Після ущільнення бетонної суміші відкриту поверхню зразка ретельно, без додавання води, загладжують. Режим тверднення зразків визначається завданнями експерименту. При цьому необхідно дотримуватись умови, щоб осадкові і температурні напруження, що виникають під час тверднення, істотно не презмінювали структуру бетону.

При виготовленні конструкцій режим тверднення контрольних зразків повинен забезпечувати ті самі волого-температурні умови, що й для бетону в конструкції або окремому її елементі. Оскільки обсяг і конфігурація зразків значно відрізняються від аналогічних параметрів натурної конструкції, під час визначення режиму тверднення слід моделювати умови, характерні для тієї частини конструкції, механічні властивості бетону якої контролюватимуть при випробуванні зразків.

У разі гідротермальної обробки конструкції за заданим режимом треба прагнути, щоб при остиганні градієнт перепаду темпера-

тур між центром зразка і його поверхнею був таким, як і в розглядуваному елементі конструкції. Зауважимо, що, на жаль, в деяких випадках означену умову не можна виконати. Це приводить до прояву масштабного ефекту, ступінь впливу якого сьогодні важко оцінити кількісно. Як засвідчує практика, під час існуючих режимів термообробки вилив температурних напружень при розмірах перерізу зразка і конструкції, менших або рівних 70 мм, можна знехтувати.

Подібність вологих умов тверднення визначається рівністю у зразку і конструкції довжин шляхів міграції вологи від центра до поверхонь, з яких вона випаровується, при однакових гідротермальних умовах на них. Цього можна досягнути, наприклад, такими засобами.

При висоті зразка, рівній відстані між взаємно паралельними поверхнями конструкції, з яких випаровується волога, слід гідроізолювати після зняття опалубки його бокові поверхні, залишивши відкритими торці. Аналогічно, якщо розмір сторін основи зразка близький до відстані між випаровувальними поверхнями конструкції, у зразку потрібно залишити не гідроізольованими дві взаємно паралельні бокові поверхні.

За виконання умов тверднення в нерозпалубленій конструкції або в масиві, коли найменший розмір поперечного перерізу у декілька раз більший за висоту зразка, останній протягом усього терміну тверднення повинен бути повністю гідроізольований.

Для лабораторних зразків, якщо цього не вимагають умови експерименту, не рекомендується застосовувати різноманітні прискорені режими тверднення, зв'язані з термовологою обробкою. Зразки після виготовлення повинні не менше 20 год знаходитися у формах в приміщенні з температурою  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і вологістю повітря не менше 90%, після чого їх можна звільняти від форми і зберігати в тих же умовах.

У випадку гідротермальної обробки для прискорення тверднення необхідно підбирати такий режим охолодження, щоб перепад температур між центром зразка і його поверхнею незалежно від розмірів поперечного перерізу не перевищив  $3^\circ\text{C}$ .

Умови зберігання лабораторних зразків після закінчення термінів, передбачених режимом тверднення, слід призначати, керуючись метою експерименту.

Якщо вони допускають тривале набирання міцності бетоном, то рекомендується забезпечувати в усіх випадках ідентичні та найбільш сприятливі для цієї мети умови:  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і вологість не менше 90%. Якщо ж програма експерименту передбачає припинення тверднення на якомусь етапі, то зразки слід висушити до постійної маси в су-

шильній шафі при температурі 50...60°C, а потім негайно гідроізолювати і зберігати в такому стані до початку механічних випробувань.

Якщо цього вимагають умови експерименту, зразки для визначення міцнісних, деформаційних і структурно-механічних характеристик можна випилати або висвердлити із спеціальних бетонних блоків або з досліджуваних залізобетонних конструкцій і виробів.

При відборі зразків з конструкцій необхідно прагнути до того, щоб вони за своєю структурою і вологістю максимально наблизились або до конструкції в цілому, або до її елемента.

При виборі дільниці конструкції (виробу), з якої припускають відбирати зразок, треба, по можливості, знаходити місця без арматурних стержнів або дроту. За відсутності цієї можливості допускається відбирати зразки з включенням арматури. Однак напрямки арматурних стержнів (дроту) повинно збігатися з напрямом поздовжньої осі зразка.

Зразки з конструкцій відбирають так, щоб її міцність, жорсткість і тріщиностійкість після вибірки не знижувалася. Місця після витягу зразків необхідно пломбувати цементно-піщаним розчином.

Режим роботи інструменту під час випилювання (висвердлювання) зразків повинен бути строго обґрунтований, оскільки зразок знаходиться під впливом зусиль, викликаних різанням, тертям свердла (пили) об бетон і т. ін., що деформують і зразок, і структурні елементи бетону. Ступінь впливу цих сил залежить від розмірів зразка, зерен великого наповнювача, його фізико-механічних властивостей, міцності розчинної частини, сили зчеплення між наповнювачем і розчином і т. д. Крім того, на зміну механічних властивостей бетону під час випилювання зразка може впливати вода, що подається для охолодження інструменту та бетону.

Під час користування алмазним інструментом слід обов'язково застосовувати охолодження. Охолоджувальна рідина (3%-й розчин соди у воді) подається під тиском 3...4 атм. і є водночас промивальною.

Можливі два способи висвердлювання – наскрізний і закритий. При першому – свердло пронизує конструкцію. При закритому – проходить на певну глибину.

При випилюванні (висвердлюванні) необхідно забезпечити виконання наступних вимог до геометрії зразків. Непаралельність торцевих поверхонь не повинна перевищувати 0,1 мм на 100 мм, а відхилення від прямого кута між боковою поверхнею й торцем  $18^0$ . Всі інші розміри повинні дотримуватись з похибкою  $\pm 1$  мм.

Випробовують зразки-близнюки, що відрізняються за масою від середньоарифметичного значення в серії не більше ніж на 3%.

Забраковані замінюють з резерву.

Зразки не повинні мати раковин, тріщин і сколів ребер.

Відібрані зразки залежно від мети експерименту або зберігають у відповідних умовах, або консервують. Консервування слід проводити негайно після витягу. Якщо такої можливості нема, допускається тимчасово (не більше 10 год) зберігати зразки, обгорнуті шаром плівки з пластикату, поліетилену й т. ін., або помістити їх у шухляду зі зволоженою тирсою. Для тривалих досліджень консервування поверхонь зразків не проводять.

Примітка. Слід мати на увазі, що охолоджувальна рідина проникає всередину бетону на 5...10 мм залежно від його щільності, тому вона може суттєво змінити природну вологість поверхневих шарів.

## 7.2. Обладнання, прилади та засоби для досліджень зразків

Лінійні розміри зразків рекомендують вимірювати за допомогою сталевих лінійок, штангенциркулів і мікрометричних скоб [127, 128].

Деформації допускається вимірювати як спеціальними екстензометрами (важільними, оптико-механічними, тензорезисторами, ємнісними і індуктивними перетворювачами, тензорезисторами і т. д.), так і приладами, призначеними для виміру лінійних розмірів (мікрометричні скоби) і переміщення (годинникові та важільно-зубчасті індикатори, прогиноміри і т. д.), пристосованими для визначення деформацій. При цьому ціна поділки приладу на вибраній базі виміру повинна фіксувати відносні деформації з точністю не нижче ніж  $2 \cdot 10^5$ , а повна шкала – забезпечувати вимірювання абсолютних деформацій без перестановок приладу під час експерименту. Зусилля, що виникає в приладі (робоче зусилля) не повинно перешкоджати деформуванню зразка під впливом зовнішніх зусиль, що прикладаються до нього в процесі випробування. Тому робоче зусилля приладу рекомендується приймати не більш ніж на 0,1%, що відрізняється від мінімального зовнішнього зусилля, коли вимірюють деформації.

Допускається використання і стаціонарно встановлених на зразок приладів для виміру деформацій, і "знімних", за допомогою яких почергово знаходять відстані між встановленими на зразку реперами, що визначають базу виміру.

Мінімальний розмір бази під час вимірювання деформацій приймають з умови, щоб деформацію можна було розглядати як інтегральну для бетону даної структури. Виходячи з цієї передумови і експериментальних досліджень, мінімальний розмір бази виміру  $l_{\min}$  рекомендують знаходити за виразом



$$l_{\min} > 5d_3, \quad (7.3)$$

де  $d_3$  – середньозважений розмір неоднорідності структури бетону.

Максимальний розмір бази приладу обмежується розміром зони зразка, напружений стан якої можна вважати однорідним. Згідно з цією передумовою

$$l_{\min} < h - 2d \quad \text{або} \quad l_{\min} < h - 2a, \quad (7.4)$$

де:  $h$  – висота зразка;  $d$  і  $a$  – діаметр і сторона основи зразка.

Номінальний розмір бази під час виміру деформацій рекомендується приймати кратним 100мм. Щоб забезпечити вимір деформацій на вибраній базі з допомогою наявних вимірювальних приладів, допускається застосування різноманітних подовжувачів. Їхня конструкція не повинна вносити будь-яких похибок.

Усі види приладів для вимірювань деформацій та лінійних розмірів повинні пройти державну і відомчу метрологічну перевірку. Їх слід градувати при встановлених подовжувачах бази виміру, а під час використання "знімних" тензовимірювальних приладів – з реперами відповідних видів.

Прилади для виміру деформацій встановлюють на зразок за допомогою спеціальних пристроїв, конструкція і принцип дії яких не повинні перешкоджати деформуванню зразка в процесі експерименту, вносити викривлення в напружено-деформований стан окремих його ділянок і заважати роботі приладів.

Кріпильні пристрої повинні забезпечувати можливість виміру деформацій протягом усього часу випробувань аж до руйнування зразка, а якщо це не вимагається програмою досліджень, то до певного передбаченого нею, рівня напружень. Методи кріплення тензовимірювальних приладів повинні запобігати виходу з ладу приладів при руйнуванні зразка.

Рекомендуються наступні методи встановлення приладів для вимірювання деформацій.

Спеціальні утримувачі кріплять безпосередньо до зразка за допомогою приклеєних до його поверхні або вмонтованих в тіло бетону анкерів. Утримувачі можуть становити одне ціле з анкером або, в свою чергу, кріпитися до нього на різьбі чи за допомогою затискувачів. Якщо прилад має пристрої для фіксації бази (опорні призми, голки і т. д.), то його закріплюють до зразка тільки одним утримувачем, що встановлюється приблизно посередині бази. Якщо прилад не має опорних призм або інших аналогічних пристроїв, то анкери з утримувачами встановлюють на кінцях бази. Тоді прилад може кріпитися до утримувачів стаціонарно або вони використовуються як репери. За базу виміру беруть відстань між осями анкерів.

Описаний метод кріплення пропонується використати під час випробувань зразків з бетону з великим наповнювачем. Площа приклеювання анкера, або розмір його частини, що вставляється в тіло бетону, повинні бути сумірні зі середнім розміром зерна великого наповнювача. Для приклеювання анкерів бажано застосовувати клеї на основі епоксидних і акрилових смол. Анкери в тіло бетону краще вставляти під час виготовлення зразків, для цього в конструкцію форм слід внести відповідні зміни.

Прилади можна встановлювати також з допомогою спеціальних рамок, що кріпляться до зразка опорними ножами або голками, сила притискання яких до бетону регулюється пружинами. Максимальне зусилля притискання не повинно переважати 0,1% мінімального значення зусилля, яким навантажується зразок при вимірюванні деформацій.

Масу зразків і форм визначають з допомогою ваг класу точності IV. Вимірювання повинно забезпечувати необхідну точність визначення їхньої об'ємної маси і коефіцієнта ущільнення. Застосовувані засоби мають пройти державну та відомчу метрологічну перевірку.

Зразки при механічних (руйнівних) методах випробувань навантажують на машинах (пресах) і установках, що забезпечують похибку виміру зусилля не більше  $\pm 1\%$ , можливість регулювання швидкості прикладеного до зразка навантаження, принаймні, в межах  $1 \dots 10 \text{ кгс/см}^2$  в 1с, і підтримувати навантаження або задану деформацію зразка з похибкою  $\pm 1\%$  впродовж не менше ніж 20 хв. Силувимірювальне устаткування повинно бути малоінерційним, фіксувати максимальне зусилля, досягнуте в процесі випробування. Бажано, щоб випробувальні машини мали системи для автоматичного навантаження зразка за заданою програмою.

Рекомендується застосовувати випробувальні машини з механічним гвинтовим і гідравлічним навантажувальними пристроями.

Для одержання порівняльних даних під час досліджень зразків з поперечними перерізами різних розмірів навантаження на зразок повинно передаватися через опорні плити, розміри яких підбирають залежно від розмірів поперечного перерізу зразка і його очікуваної міцності.

Підібрані так опорні плити або кріплять до стандартних опорних плит випробувальних машин, або встановлюють замість них.

Опорну поверхню таких плит необхідно чисто обробити.

### **7.3. Підготовка зразків до випробувань**

Перед випробуваннями потрібно відібрати з партії дефектні зразки, результати випроб яких можуть перевернути середнє зна-

чення шуканої механічної характеристики. Відбір рекомендується проводити за декількома параметрами: зовнішньому вигляду; відхиленню значень об'ємної маси окремих зразків від середнього по партії (серії); ступенем однорідності акустичних характеристик бетону по партії й анізотропією акустичних властивостей окремого зразка і т. д. Під час візуального огляду вибраковуюють зразки з зовнішніми раковинами, що виникають в результаті нерівномірного розподілу розчинної частини зразка під час ущільнення бетонної суміші, і тріщинами зламу (зсідальні тріщин допускають). Під час механічних (руйнівних) випробувань рекомендується вибраковувати зразки зі сколами ребер торцевих граней [127, 128].

Допускається залишати для дослідження зразки з незначними сколами ребер бокових граней і повітряними порами невеликих розмірів на поверхні. При цьому глибина сколів не повинна перевищувати величину середнього діаметра зерна великого наповнювача ( $d_3$ ) і їх кількість - 1-2 на кожне ребро. Діаметр повітряних пор має бути менше 3 мм. Об'ємна маса бетону кожного зразка визначається за формулою

$$\gamma_0 = \frac{M}{V}, \quad (7.5)$$

де:  $\gamma_0$  – об'ємна маса зразка;  $M$  – маса зразка;  $V$  – об'єм зразка, що вираховують за результатами виміру довжин його сторін (діаметра) і висоти.

Об'ємну масу слід вимірювати з похибкою до  $\pm 0,05\%$ , що забезпечується при вимірі лінійних розмірів з похибкою не вище  $\pm 0,5\%$  і маси з похибкою не вище  $\pm 0,1\%$ .

Під час підрахунку об'ємної маси зразка можлива поява похибки через деяке відхилення фактичної форми зразка від ідеальної геометричної. Тому для забезпечення необхідної точності значення кожного лінійного розміру приймають як середнє арифметичне декількох вимірів. Висоту зразка ( $h$ ) вимірюють за серединами двох протилежних бокових граней або за утворювальними, що проходять через один діаметр; розмір сторони  $a$  і діаметра  $d$  - за вісьмома вимірами. При цьому вимірюють всі чотири сторони або чотири діаметри, послідовно через кожні  $45^\circ$ ; кожну сторону діаметра – в двох точках за висотою зразка приблизно на відстані  $1/3 h$  від торців.

Акустичні характеристики бетону (швидкість розповсюдження і загасання поздовжніх і поперечних хвиль) зв'язані з його структурою і механічними властивостями. Тому неоднорідність розподілу механічних властивостей в партії зразків або в об'ємі окремого

зразка можна оцінювати з допомогою акустичних методів.

Неоднорідність акустичних характеристик в партії зразків викликана неоднаковим ступенем ущільнення бетонної суміші в окремих зразках. Для визначення ступеня акустичної неоднорідності бетону в партії зразків вимірюють час проходження поздовжніх або поперечних ультразвукових хвиль в кожному зразку. При цьому випромінювач і приймач ультразвуку встановлюють у центрах торцевих граней зразка. Тривалість проходження ультразвукового сигналу приймається як середнє арифметичне трьох незалежних вимірів.

Різниця значень вимірної швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу в партії зразків не повинна переважати 5%.

Анізотропія акустичних властивостей зразка відносно напрямку укладання бетону зв'язана з анізотропією його механічних властивостей. Якщо треба дослідити механічні властивості ізотропного матеріалу, то зразки з істотною акустичною анізотропією слід вибракувати.

Щоб з'ясувати наявність акустичної анізотропії, порівнюють швидкості розповсюдження хвиль вздовж напрямку укладання бетонної суміші і нормально до нього. Якщо акустичні властивості бетону ізотропні відносно напрямку його укладання, то значення швидкостей розповсюдження ультразвукових хвиль являє собою єдину сукупність статистичних величин. Якщо матеріал анізотропний, то в результаті статистичної обробки отримують дві різноманітні сукупності швидкостей. Кожна з них матиме своє середнє арифметичне значення і свій коефіцієнт варіації.

Під час виміру швидкостей поперечних ультразвукових хвиль слід враховувати поляризацію коливального руху. Напрямок поляризації може бути заданий як вздовж укладання бетону, так і по нормалі до нього.

Для забезпечення рівномірної передачі навантаження на торець зразка при механічному методі випробування рекомендується на торець приклеювати металеві пластини, товщину пластин приймають приблизно рівною одній десятій діаметра (сторони) основи. Розміри пластин мають бути не менші відповідних розмірів основи зразка і не повинні їх перевищувати більш ніж на товщину пластини. Поверхню плит необхідно чисто обробити. Плити приклеюють до торців зразка цементним розчином або гіпсом. Товщина шару не більш 0,5 мм.

Кількість приладів для вимірювання деформацій визначається метою та умовами експерименту. Однак їх мінімальну кількість беруть з умови одержання усереднених значень деформаційних характеристик матеріалу. Під час випробування зразків-призм рекомендується

ся встановлювати посередині кожної грані один прилад для виміру поздовжніх і в межах його бази ще один прилад для виміру поперечних деформацій. При випробуванні зразків-циліндрів по твірних, розташованих через 90 або 120°, рекомендується встановлювати також попарно прилади для виміру поздовжніх і поперечних деформацій.

Перед установкою приладів на поверхні зразка розмічають бази для виміру деформацій і місце приклеювання анкерів та кріпильних рамок або інших аналогічних пристроїв. Розмітку здійснюють за допомогою штангенциркуля або металевої лінійки з похибкою не вище  $\pm 0,5\%$ .

Віддаль між кінцем бази приладу для виміру поздовжніх деформацій і найближчою торцевою поверхнею повинна бути не менше, ніж діаметр (сторона) основи зразка.

Під час установки зразків у випробувальну машину слід передбачити засоби і пристроїв для запобігання псування приладів при руйнуванні зразка, для чого рекомендується одягати на зразок спеціальні запобіжні металеві рамки. За допомогою гнучких тяг рамки треба кріпити до штанг випробувальної машини або стійок, щоб утримати зразок від падіння. Методи кріплення запобіжних рамок до зразка і випробувальної машини та приладів до них не повинні заважати випробуванням і переключувати результати виміру деформацій і міцності.

Перед початком експериментів вибирають діапазон навантажень на силовимірній шкалі випробувальної машини, що відповідає очікуваній міцності зразка. Руйнівна сила навантаження повинна вкладатися на вибраній шкалі приблизно в межах 70..85% від максимального зусилля для неї.

При цьому навантаження, що становить 30% від очікуваного руйнівного, повинно бути не нижче 20% від максимального зусилля вибраної шкали силовимірювача і 10% від граничного для даної випробувальної машини (преса).

За необхідності (залежно від методів дослідження) зразки (виріб) слід висушити, щоб їхня вологість не була вище 2%.

Висушувати необхідно при температурі не вище 50...60°C, оскільки тоді зменшується ймовірність виникнення порушень структури бетону внаслідок бурхливого випаровування вологи.

#### **7.4. Проведення випробувань**

Загальна тривалість випробувань серії зразків обмежується терміном, впродовж якого не повинна істотно змінюватися їх міцність внаслідок тривалої гідратації цементу. Тривалість експерименту в кожному конкретному випадку залежатиме від ряду причин:

допустимого в даному випадку збільшення міцності бетону; його віку до початку випробування; водоцементного відношення; обсягу втягнутого під час бетонування повітря; ступеня гідратації в'язучого; умов тверднення і т. д [127, 128].

Безпосередньо перед початком механічних випробувань перевіряють роботу приладів, призначених для виміру деформацій, і центрують зразок у випробувальній машині. Обидві ці операції можна сумістити. Роботу приладів контролюють в процесі чергування циклів завантаження і розвантаження у випробувальній машині зразка з встановленими на ньому приладами. Робота приладу задовільна, якщо його покази за нульового навантаження і певного рівня завантаження з похибкою до  $\pm 0,25$  поділки збігаються відповідно для декількох циклів. Усього рекомендується провести три-чотири таких цикли. Якщо покази приладу для двох суміжних циклів не збігаються, необхідно перевірити його встановлення і кріплення, а в деяких випадках – роботу реєстраційних приладів і комутаційних ліній.

Зразок центрують спочатку за геометричною, а після цього за фізичною осями зразка. Центрування за геометричного полягає в суміщенні її з віссю прикладення зовнішнього стискального зусилля. Однак, інколи для створення в середній частині зразка умов одновісного стиску цього недостатньо. Через деяку нерівномірність розподілу пильності бетону по поперечному перерізу зразок під час завантаження деформується як позацентрово стиснутий. Тому центрування за фізичною віссю зводиться до його встановлення в машині таким чином, щоб в середній по висоті частині напружений стан відповідав одновісному стиску.

Під час центрування за геометричною віссю слід сумістити осі бокових граней зразків-призм або твірних, що проходять через два взаємно перпендикулярних діаметри зразків-циліндрів, зі спеціальною розміткою, нанесеною на нижню опорну плиту випробувальної машини.

По фізичній осі центрують з допомогою приладів для виміру деформацій при навантаженнях і розвантаженнях зразка. За приладами, встановленими в середній частині зразка по осях всіх чотирьох граней (у випадку зразка-призми) або твірних, розташованим чорний 90 або 120° (у зразку-циліндрі), вимірюють деформації при завантаженні зразка до певного рівня напружень. Якщо покази окремих приладів відрізняються від середнього значення не більш ніж на  $\pm 0,5$  поділки, то центрування вважається задовільним. В протилежному випадку після зняття навантаження зразок зміщується до найбільшої деформації і операція повторюється. Зразок під час центрування

зміщують або вручну, або з допомогою спеціальних пристроїв, закріплених на нижній опорній плиті випробувальної машини.

Рівень навантаження зразка під час перевірки роботи приладів і центрування залежить від ряду умов і мети експерименту. Що більше навантажень, то точніше центрування. Однак, в процесі попередніх циклічних навантажень в бетоні можуть відбутися незворотні зміни структури (мікротріщиноутворення і т. д.). Тому бажано, щоб рівень навантаження був якомога нижчим. Оскільки процес інтенсивного мікротріщиноутворення звичайно починається під напруженнями, приблизно рівними 30...50% від руйнівних, то рівень навантаження при центруванні і перевірці роботи приладів не повинен перевищувати 30% від межі міцності, тобто  $0,3f_{ck,prizm}$ , де  $f_{ck,prizm}$  – призматична міцність бетону.

Якщо в експерименті не ставилася мета побудувати діаграму напруження-деформація ( $\sigma-\varepsilon$ ), а, наприклад, тільки визначити призмову міцність бетону, то рівень навантаження може дорівнювати  $\sigma_j = f_{ck,prizm}$ . У разі побудови діаграми  $\sigma-\varepsilon$ , включаючи її початкову дільницю, рівень навантаження повинен бути не більшим  $0,1...0,15 f_{ck,prizm}$ .

Швидкість зростання навантаження під час випробування зразка залежно від мети експерименту і застосовуваного випробувального обладнання (машин, пресів, установок і т. д.) вибирають так, щоб швидкість збільшення напружень осьового стиску в зразку знаходилася в межах  $0,01...0,6$  кгс/см<sup>2</sup> за 1 с. Тоді максимальна відмінність у значеннях міцності, отриманих при крайніх значеннях швидкостей навантаження, не перевищить 5%.

Метод навантаження зразка під час механічних випробувань залежить від мети експерименту і наявних випробувальних установок і приладів. Звичайно в експериментальній практиці, вимірюючи механічні характеристики бетону під осьовим короткочасним статичним стиском, використовують безперервне, ступінчате і ступінчато-циклічне навантаження. Загалом результати виміру характеристик міцності, деформаційних і структурно-механічних параметрів бетону залежать від прийнятого методу досягнення заданого рівня напружень. Для забезпечення найбільш простого закону слід застосовувати безперервне навантаження.

При безперервному навантаженні саме навантаження на зразок монотонно зростає від нуля до моменту руйнування з постійною швидкістю або зі швидкістю, що поступово зменшується.

При ступінчастому завантаженні навантаження збільшують від нуля до певного рівня, на якому його витримують протягом деякого часу з похибкою  $\pm 0,5$  поділки шкали силовимірювача випробувальної машини, далі навантаження піднімають до вищого рівня і витримують на ньому. Так досягається навантаження, що руйнує зразок.

Ступінчасто-циклічний метод завантаження має декілька варіантів, що різняться способами навантаження після досягнення першого рівня (ступеня) навантаження.

За одним варіантом після досягнення першого рівня зразок розвантажують до умовного нуля, не вище 0,05 від очікуваного руйнівного навантаження. Після цього цикл навантаження до першого рівня і розвантаження повторюють декілька разів, потім навантаження піднімається до наступного вищого рівня й операція повторюється.

За іншим підняте до першого рівня навантаження витримують деякий час, а пізніше зразок розвантажують до умовного нуля, де також витримують навантаження. Далі його піднімають до наступного вищого рівня і операцію повторюють. Можливий також варіант ступінчасто-циклічного навантаження, коли розвантажують не до умовного нуля, а до одного з попередніх рівнів навантаження.

За циклічного методу навантаження і високих рівнів навантажень можливо інтенсивніше руйнування бетону, ніж при безперервному і ступінчастому, тому руйнівне навантаження може бути де-що занижене. Залежно від мети експерименту рекомендується після досягнення рівня 60...70% від руйнівного навантаження далі навантажувати ступінчасто.

Під час визначення призмової міцності бетону  $f_{ck, prizm}$  прямим механічним випробуванням до руйнування вимірюють максимальне навантаження, досягнуте в процесі навантаження зразка. Навантажувати можна одним з вищезгаданих методів. При цьому швидкість навантаження на окремих етапах і загальна середня випробування, що визначається повною його тривалістю, повинні знаходитися в межах  $0,1...6$  кгс/см<sup>2</sup> за 1 с.

Поздовжні і поперечні деформації вимірюють в середній частині зразка в процесі його навантаження від 0 до  $f_{ck, prizm}$ .

Метод навантаження при визначенні вищезгаданих деформаційних характеристик бетону можна відібрати залежно від поставлених в експерименті задач.

Відлік на приладах залежно від мети експерименту і наявних вимірювальних засобів можна знімати шляхом безперервного запи-



су (самописцем, шлейфовим осцилографом) або дискретними замірами за певних рівнів навантаження.

Деформації вимірюють або в процесі безперервного завантаження (розвантаження), або під час витримування навантаження протягом деякого часу на певних рівнях. За безперервного завантаження і дискретного способу підрахунку покази з усіх приладів знімають одночасно. При невеликій кількості приладів (два-три) допускається знімати з них покази по чергово з різницею в часі не більш ніж 2...3 с.

При вимірі деформацій бетону приймають, що повна деформація в загальному випадку складається з пружної і не пружної:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pr} - \varepsilon_{pl}, \quad (7.6)$$

де:  $\varepsilon_p$  – повна відносна деформація;  $\varepsilon_{pr}$  – пружна частина повної відносної деформації;  $\varepsilon_{pl}$  – не пружна частина повної відносної деформації, що охоплює пружну післядію ( $\varepsilon_{pr,p}$ ), а також залишкову деформацію ( $\varepsilon_{zal}$ ).

Частину  $\varepsilon_{pr}$  слід вимірювати при деформуванні матеріалу зі швидкістю звуку, коли не пружна реакція матеріалу не проявляється суттєво. Однак під час статичних випробувань ця умова практично не виконується. Тому за цю складову повної деформації беруть виміряну при швидкостях навантаження не менше 4...6 кгс/см<sup>2</sup> за 1 с.

Пружну частину деформації в такому розумінні можна вимірювати під будь-яким способом навантаження. При ступінчастому і ступінчасто-циклічному швидкість навантаження (розвантаження) на ступені повинна бути не нижче 4...6 кгс/см<sup>2</sup> за 1 с. Відлік на приладах слід здійснювати, як мінімум, на початку і в кінці збільшення навантаження від одного рівня на інший.

При дискретному способі відліку покази всіх приладів, що вимірюють позовжні деформації, необхідно знімати водночас.

За повну деформацію при даному рівні напруження приймають максимальну деформацію, виміряну під час завантаження (розвантаження) з мінімально можливою швидкістю, яку можна досягнути при статичних випробуваннях, тобто еквівалентною. Повну деформацію можна вимірювати будь-яким з описаних вище методів навантаження. У випадку ступінчастого і деяких варіантів ступінчасто-циклічного при визначенні необхідної швидкості навантаження слід розглядати середню швидкість випробування, знайдену з загальної його тривалості з урахуванням часу витримування навантаження на ступенях завантаження.

*Примітка.* Треба мати на увазі, що методом безперервного завантаження можна на одному і тому самому зразку вимірювати тільки одну деформацію (по-

вну або пружну). Іншими методами можна водночас визначати як повну деформацію, так і її пружну і не пружну частини. При цьому ступінчасто-циклічним методом також вимірюють залишкову деформацію.

За швидкість навантаження, відповідну еквівалентній деформування бетону, беруть таку швидкість неперервного завантаження, за якої практично не проявляються не пружні деформації у разі зупинки навантаження і витримки досягнутого навантаження протягом часу, співмірного з тривалістю короточасних статичних випробувань. Еквівалентна швидкість навантаження нелінійно залежить від напружень і зменшується з їхнім збільшенням.

Під напруженнями в бетоні, більшими нижньої межі мікротріщиноутворення, еквівалентна швидкість навантаження починає різко зменшуватися і прямує до нуля при напруженнях, які відповідають тривалій міцності бетону.

Під безперервним і ступінчастим навантаженнями зі швидкістю, більшою ніж еквівалентна деформування бетону, вимірювана повна деформація залежатиме від швидкості завантаження. В діапазоні швидкостей навантаження, під час короточасних статичних випробувань ( $0,1 \dots 6$  кгс/см<sup>2</sup> за 1с), можливі варіації деформаційних характеристик бетону не перевищують 10%. Однак при ступінчастому завантаженні від швидкості навантаження на ступені і тривалості витримки навантаження на ній залежатиме співвідношення між пружною ( $e_{пр}$ ) і непружною ( $e_{нп}$ ) частинами повної деформації.

При випробуванні зі швидкостями, рівними або меншими за еквівалентну, завжди можна заміряти повну деформацію незалежно від типу завантаження (рівномірне або ступінчасте).

Середню швидкість навантаження, відповідну еквівалентній деформування бетону, з достатньої для практичної мети точністю рекомендується визначати за такою методикою.

Зразок завантажують ступенями зі швидкістю підйому навантаження на ступені не менше  $4 \dots 6$  кгс/см<sup>2</sup> за 1с. На кожному ступені навантаження витримують до того часу, поки практично не припиниться приріст деформації.

Припинення розвитку деформації фіксують після триразового повторення одного і того ж значення під час вимірів через кожні 1...2 хв, які проводять при витримці. Завантаження продовжують до досягнення такого рівня навантаження, коли тривалість стабілізації деформації не перевершить 20 хв. Поділивши значення напружень у бетоні, що відповідають встановленому рівню навантаження, на час, необхідний для його досягнення (за винятком часу, впродовж

якого не був виявлений розвиток деформацій), одержують середню еквівалентну швидкість навантаження. Вона не залежить від значення ступенів завантаження. Однак, в експерименті зручно завантажувати ступенями 0,1...0,05 від руйнівного навантаження.

На основі експериментальних досліджень для практичної мети можна рекомендувати такі параметри завантаження під час виміру повної деформації бетону. За ступінчастого і ступінчато-циклічного методів швидкість зростання навантаження на ступені повинна бути не менше  $4...6 \text{ кгс/см}^2$  за 1с; тривалість витримки її на ступенях, менших 30% від руйнівного, слід приймати 3...5 хв. Під навантаженнями від 30 до 70% від руйнівного витримку слід збільшити до 10...15 хв. При вищих і відповідних їм напруженнях "еквівалентна" швидкість деформування починає прямувати до нуля, тривалість витримки - до нескінченності, а заміряна за цих умов міцність наближається до тривалої міцності. Оскільки, під час статичних короточасних випробувань визначають призмову міцність бетону і тривалість експерименту обмежена декількома годинами, при навантаженнях, більших 70% від руйнівного, тривалість витримки на ступені рекомендується 15...20 хв.

При використанні ступінчато-циклічного завантаження без витримок слід мати на увазі, що кількість циклів навантаження-розвантаження, необхідних для виміру повної деформації, при рівнях завантаження, які не перевищують 60...70% від руйнівного, звичайно не більше 5...7. При більших завантаженнях приріст не пружних деформацій стає незатухальним, тому далі навантажувати слід ступінчато.

Залишкову деформацію вимірюють після розвантаження зразка від вищого до меншого рівня навантаження. Найчастіше її визначають при розвантаженні до повного або умовного нуля. Вимірюють також, використовуючи ступінчато-циклічний метод.

*Примітка.* Під навантаженнями важких бетонів з великим високоміцним наповнювачем зусилля перерозподіляються між пружним великим наповнювачем і розчинною частиною з не пружними властивостями. Під час розвантаження це приводить до того, що поверхня виготовленого у формі зразка тонкого шару розчину, деформується не так, як інший його перетин. Тому при визначенні залишкових деформацій у такому бетоні рекомендуються вимірювальні прилади встановлювати з допомогою утримувачів та анкерних пристроїв, що вмонтовуються в тіло бетону.

**Визначення деформації усадки бетону.** За еталонну осадку приймають деформацію ненавантажених і неізольованих призм, яка вимірюється під час природного тверднення бетону відразу після закінчення його схоплення (затвердіння), але не пізніше тридобового віку, а при термовологій обробці бетону – після охолодження зразків.

Терміни подальших вимірів деформацій обумовлюються необхідністю виявлення характеру розвитку осадки в часі [41].

Деформації рекомендують вимірювати протягом перших 7 діб кожен день, від 7 до 15 доби – через день, в наступні 45 діб – два рази в тиждень, а далі до 120 діб – один раз у тиждень і до кінця випробувань, як правило, два рази в місяць.

Для визначення деформації повзучості бетону вимірюють пружні і довготривалі деформації на навантажених зразках, а також деформації осадки на ненавантажених зразках-близнюках, які знаходяться в однакових умовах з навантаженими як до їх навантаження, так і впродовж всього часу випробувань.

За еталонну повзучість бетону природного тверднення та бетону з термовологою обробкою приймають повзучість, визначену за результатами дослідження призми, навантаженої у віці 28 діб довготривалим навантаженням, напруженість від якого становить 40% відповідної призмової міцності, і за даними випробувань ненавантажених призм-близнюків.

Терміни подальших вимірів деформацій спричинені необхідністю виявлення характеру повзучості та осадки в часі. Після закінчення навантаження відлік за приладами рекомендується брати через 1; 3; 6 і 24 год, в подальші 6 діб – кожен день, а з 7 до 15 доби – через день, протягом наступних 45 діб – два рази в тиждень, потім до 180 доби – раз у тиждень і далі, до кінця випробувань, як правило, два рази в місяць.

На ненавантажених зразках-близнюках деформації вимірюють у ті ж терміни, що й на навантажених.

**Визначення деформації післядії.** Після закінчення довготривалих випробувань для визначення деформації повзучості бетону призми розвантажують. Відлік за приладами здійснюють перед розвантаженням і після нього.

Відлік за приладами розвантажених зразків рекомендується проводити протягом 1–2 місяців після розвантаження. Одночасно необхідно знімати покази на приладах раніше не навантажених зразках-близнюках.

### **7.5. Обробка результатів випробувань і визначення міцнісних, деформаційних і структурно-механічних властивостей бетону**

Міцнісні, деформаційні і структурно-механічні характеристики бетону – результат так званих прямих і побічних вимірів [2],

причому останні зв'язані з використанням ряду підрахунків за даними прямих (безпосередніх) вимірів лінійних розмірів, переміщень, мас, сил та часу. При цьому доцільно завчасно обчислити такі величини, як площа поперечного перерізу, напруження осьового стиску, відносна деформація.

Площу  $F$  поперечного перерізу зразка (виробу) розраховують на основі лінійних розмірів, знайдених до випробування. Точність підрахунку не повинна бути вища точності виміру лінійних розмірів.

Напруження осьового стиску знаходять за формулою

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (7.7)$$

де  $P$  – зусилля, виміряне за шкалою силовимірювача випробувальної машини.

Відносна деформація

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (7.8)$$

де:  $\Delta l$  – абсолютна деформація, виміряна в процесі експерименту;  $l$  – довжина бази вимірювання.

Похибка підрахунку відносної деформації залежить від мети експерименту, але не повинна бути нижче похибки вимірювання абсолютної деформації або самої бази.

Якщо під час випробувань виміряні деформації на окремих гранях зразка, то для подальшого знаходження деформаційних і структурно-механічних характеристик необхідно підрахувати середнє арифметичне значення поздовжньої та поперечної деформацій для зразка загалом.

Призмову міцність бетону за результатами механічних випробувань для кожного окремого зразка обчислюють за формулою

$$f_{c,prizm} = \frac{P_{max}}{A}, \quad (7.9)$$

де  $P_{max}$  – руйнівне навантаження, отримане експериментально.

Призмову міцність рекомендують вираховувати з похибкою не гіршою, ніж похибка силовимірювача випробувальної машини, яка здебільшого рівна  $\pm 1\%$ .

Статичний модуль пружності ( $E_{c,pr}$ ) знаходять так:

$$E_{c,pr} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{pr}}, \quad (7.10)$$

де:  $\sigma$  – напруження, за яким вимірюється статичний модуль пружності;  $\varepsilon_{pr}$  – пружна частина повних відносних поздовжніх деформацій, виміряних при напруженні  $\sigma$ .

Під час статичних короточасних випробувань модуль пружності рекомендується вимірювати у визначеному інтервалі напружень.

Нижній рівень напруження приймають з умови отримання необхідної точності вимірювання модуля. Серійні прилади для вимірювання деформацій забезпечують похибку вимірювання статичного модуля на рівні напруження  $0,15 \dots 0,25 f_{c, prizm}$  не нижче  $\pm 7\%$  і відповідно при рівні напруження  $0,3 \dots 0,45 f_{c, prizm}$  не нижче  $\pm 4\%$ .

Верхній рівень беруть з умови, що з його досягненням в бетоні не починається інтенсивне мікротріщиноутворення, тобто він повинен бути менше нижньої межі утворення мікротріщин ( $f_{c, crc}^0$ ).

На основі експериментальних досліджень  $E_{c, pr}$  рекомендується вимірювати при значеннях  $\sigma = 0,3 - 0,4 f_{c, prizm}$ .

Коефіцієнт повних поперечних деформацій ( $\nu_p$ ), який розраховують за результатами статичних короткочасних випробувань, являє собою відношення значень відносних деформацій, виміряних відповідно по нормалі до осі стискального зусилля та вздовж нього:

$$\nu_{p\sigma} = \frac{\bar{\varepsilon}_{pop}}{\bar{\varepsilon}_{poz}}, \quad (7.11)$$

де:  $\nu_{p\sigma}$  – коефіцієнт повних поперечних деформацій при даному рівні напружень;  $\bar{\varepsilon}_{pop}$  – середнє значення відносної поперечної деформації;  $\bar{\varepsilon}_{poz}$  – середнє значення відносної повздовжньої деформації.

При визначенні коефіцієнта поперечних деформацій значення  $\bar{\varepsilon}_{pop}$  і  $\bar{\varepsilon}_{poz}$  беруть при одних і тих же рівнях напружень  $\sigma$ .

Під час знаходження коефіцієнта поперечних деформацій можна використовувати як значення повних відносних деформацій, так і пружні, і не пружні частини. Тому можна визначити і повний коефіцієнт поперечних деформацій ( $\nu$ ), і його пружну ( $\nu_{pr}$ ) та не пружну ( $\nu_{pl}$ ) частини.

Пружну частину можна прирівняти до коефіцієнта Пуассона.

Оцінюючи структурні зміни у бетоні під зовнішнім осьовим стискальним зусиллям і для визначення його структурно-механічних характеристик за результатами короткочасних статистичних досліджень, вираховують ряд деформаційних характеристик. До них відносяться: об'ємна деформація ( $\varepsilon_v$ ), її приріст ( $\Delta\varepsilon_v$ ) та коефіцієнт приросту поперечних деформацій ( $\nu$ ).

Об'ємну деформацію розраховують як алгебраїчну суму головних відносних деформацій, тобто деформацій, виміряних вздовж осі дії стискального зусилля і по двох нормальних до нього і взаємно ортогональних напрямках:

$$\varepsilon_v = \bar{\varepsilon}_{\text{роз}} + 2\bar{\varepsilon}_{\text{поп}}, \quad (7.12)$$

Приріст відносної об'ємної деформації  $\Delta\varepsilon_v$  розраховують за формулою:

$$\Delta\varepsilon_v = \Delta\bar{\varepsilon}_{\text{роз}} + 2\Delta\bar{\varepsilon}_{\text{поп}}, \quad (7.13)$$

де:  $\Delta\bar{\varepsilon}_{\text{роз}}$  – приріст середньої відносної повздовжньої деформації;  $\Delta\bar{\varepsilon}_{\text{поп}}$  – приріст середньої поперечної деформації зі збільшенням напруженості осьового стиску на  $\Delta\sigma$ .

Коефіцієнт приросту поперечних деформацій розраховують так:

$$\nu = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}_{\text{поп}}}{\Delta\bar{\varepsilon}_{\text{роз}}}. \quad (7.14)$$

Для оцінки кінетики мікротріщиноутворення в бетоні під час зростання зусиль осьового стиску визначають його структурно-механічні характеристики ( $f_{c, \text{crc}}^0$  та  $f_{c, \text{crc}}^v$ ). Напруженість осьового стиску, рівна  $f_{c, \text{crc}}^0$ , відповідає початку інтенсивного утворення в бетоні мікротріщин, що призводять до незворотних структурних змін. Напруженість осьового стиску, рівна  $f_{c, \text{crc}}^v$ , відповідає початку утворення магістральних тріщин руйнування.

Знаючи нижню і верхню межі напруженостей мікротріщиноутворення, вираховують відносний діапазон напруженостей ( $\Delta f_{c, \text{crc}}^0$ ), коли в бетоні даного виду спостерігається утворення мікротріщин:

$$\Delta f_{c, \text{crc}} = f_{c, \text{crc}}^v - f_{c, \text{crc}}^0. \quad (7.15)$$

## 7.6. Визначення довговічності армоцементу

Довговічність конструкцій залежить від часу, протягом якого зберігається їх несуча здатність.

Залежно від факторів, дія яких визначає довговічність, розрізняють стійкість конструкцій в агресивному середовищі, морозостійкість, водонепроникність.

Довговічність армоцементу в агресивному середовищі визначається [7, 10, 11]: щільністю і властивостями дрібнозернистого бетону, в тому числі виглядом цементу і піску, складом суміші, додатками, технологією приготування бетонної суміші, формуванням і твердненням виробів; фактичною товщиною захисного шару бетону; наявністю і властивостями захисних покриттів арматури і конструкцій; умовами роботи конструкцій, в тому числі напруженим станом і шириною розкриття тріщин [127, 128].

Зниження міцності армоцементу в середовищі при даних характеристиках визначається корозією арматури (тонкої сталевий сітки) і бетону.

Корозійну стійкість армоцементу визначають під час випробувань в природних і експлуатаційних умовах або шляхом прискорених лабораторних досліджень. Розрізняють дослідження на загальну корозію і корозію під напруженням за постійної деформації (ширині розкриття тріщин) або навантаження.

Зниження міцності армоцементу під час корозійних випробувань можна фіксувати прямими та побічними методами.

Використовуючи прямі, порівнюють міцнісні характеристики армоцементних зразків, що знаходилися в неагресивному (контрольному) і агресивному середовищах. У побічних методах корозійну стійкість армоцементу можна оцінити:

- візуально;
- за корозійним руйнуванням окремих дротин;
- за зміною маси сталі;
- за глибиною вогнищ корозії сталі;
- за відносною площею корозійних руйнувань сталі;
- за глибиною нейтралізації бетону захисного шару;
- за швидкістю корозії дрібнозернистого бетону, що визначається лугуванням СаО;
- за зміною маси армоцементу;
- за газопроникністю армоцементу;
- за електропровідністю захисного шару бетону і покриттів;

Корозійні випробування армоцементних зразків проводять у віці не менше 28 діб.

Дослідження армоцементних зразків на атмосферну корозію в природних умовах, а також прискорені випробування проводять згідно з існуючими державними стандартами.

В газових середовищах зразки поміщають в герметичні камери або автоклави, обладнані приладами для подачі газу під тиском, а також приладами для контролю тиску, температури і газоаналізатором.

У випарах агресивних рідин зразки розташовують в герметичних камерах над судинами, що містять ці рідини заданої концентрації. Відхилення концентрації рідин не повинні перевищувати 10%, що контролюється періодичним відбором і аналізом їх проб.

Для випробувань в агресивних рідких середовищах використовують ванни, занурюючи зразки повністю, дотикаючи до рідини лише лицевої його поверхню (залежно від програми досліджень), періодично занурюючи і висушуючи.

В усіх випадках корозійну поведінку армоцементу оцінюють одним або декількома з наведених далі методів.



**Візуальна оцінка.** Під час візуальної фіксують:

- зміну кольору поверхні без видних продуктів корозії (покрить бетону й арматури);
- наявність і характер дроту продуктів корозії (рівномірний, нерівномірний, щільний, пухкий, викришувальний, колір дроту);
- наявність і характер шару продуктів корозії (рівномірний, нерівномірний, щільний, пухкий, опадаючий, колір дроту);
- наявність і характер вогнищ корозії – іржавих плям, точок;
- наявність і характер руйнування бетону (тріщини, їхні розміри, сколи, здуття).

Під час огляду розрізняють такі вигляди вогнищ корозії: точкове – розміром до 1,5 мм, плямами – більше 1,5 мм і здуття покриття.

При огляді армоцементних зразків з захисними покриттями додаково оцінюють стан покриття: втрату блиску, зміну кольору, брудотримання, вивітрювання, розтріскування, відшарування, пухирі, корозію.

Зразки оглядають при розсіяному денному світлі в приміщенні з вікнами на північну сторону. Огляд здійснюють не менше дві особи. Рекомендується фотографування зразків.

Корозійну стійкість армоцементу аналізують за часом появи першого вогнища корозії арматури (іржавої плями) на поверхні зразка заданих розмірів, за кількістю корозійних вогнищ на зразку після заданого часу (при точковому пошкодженні – за величиною частотного показника корозії), при пошкодженні плямами і здуттями - за показником, що характеризує відношення пошкодженої поверхні до оцінюваної поверхні зразка, у відсотках.

Для визначення частотного показника корозії на зразок накладають пластину з прозорого матеріалу з нанесеною на неї сіткою, що ділить поверхню на квадрати розміром 5x5 мм. Всі квадрати повинні бути пронумеровані. При розташуванні вогнища корозії на межі двох квадратів враховується тільки один квадрат.

Частотний показник корозії у відсотках

$$C = n \cdot 100 / N, \quad (7.16)$$

де:  $n$  – кількість квадратів, що мають одне і більше корозійних вогнищ;  $N$  – загальна кількість квадратів на поверхні зразка.

**Оцінка за корозійним руйнуванням окремих дротин.** Корозійне руйнування окремих дротин у зразку визначається під час вимірювання їхнього електричного опору. При цьому встановлюється:

- а) повне руйнування дроту за різким збільшенням його опору;
- б) зменшення перерізу дроту за поступовим збільшенням його опору (прийнятно тільки під час рівномірної корозії арматури).

Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за часом до руйнування першого дроту, за кількістю зруйнованих дротин за певний час, виражену у відсотках від усієї кількості дротин, що досліджуються, і за зменшенням перерізу дротин. Зменшення перерізу дротин у відсотках:

$$\Delta S = \rho \cdot l / (R_K - R_H), \quad (7.17)$$

де:  $\rho$  – питомий опір, Ом мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – довжина ділянки дроту, що вимірюється, м;  $R_H$  і  $R_K$  – опір дроту відповідно до і після корозійних випробувань, Ом.

Питомий опір кожного дроту

$$\rho = R_H S / l, \quad (7.18)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу дроту, мм.

**Оцінка за зміною маси сталі.** Така оцінка використовується при дослідженні зразків зі сталевими пластинами.

Проби зразків розколюють і витягають сталеві пластини. їх очищають від часток цементного каменю і продуктів корозії травленням у розчині соляної кислоти. Паралельно протравлюють три очищені контрольні зразки таких же розмірів для визначення втрат основного металу. Після вилучення продуктів корозії пластини промивають водопровідною, а потім дистильованою водою, висушують, витримують 24 год в ексікаторі і зважують.

Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за швидкістю корозії арматури – сталевих пластин, та за швидкістю проникнення корозії в арматуру (за масою).

Швидкість корозії арматури – в г/м<sup>2</sup>рік:

$$K = \Delta P / FT, \quad (7.19)$$

де:  $\Delta P$  – корозійні втрати на пластині, г;  $F$  – поверхня пластини, м<sup>2</sup>;  $T$  – час іспитів, рік.

Швидкість проникнення корозії в арматуру за масою – при рівномірній корозії, мм/рік:

$$P_p = K \cdot 10^{-3} / \rho, \quad (7.20)$$

де  $\rho$  – густина сталі, г/см<sup>3</sup>.

**Оцінка за глибиною вогнищ корозії сталі.** Таку оцінку застосовують під час випробувань зразків з тонкою сталеву сіткою і сталевими пластинами. Вона також можлива після досліджень зразків з окремими дротинами.

Після підготовки сталеві зразки (пластини, сітки, окремі дротини) оглядають під бінокулярним стереоскопічним мікроскопом для визначення виду корозії (рівномірна, нерівномірна, точкова, плямами, наскрізна) і її особливостей, площі корозійних руйнувань на пластинах, найглибших вогнищ корозії.

Корозійну стійкість армоцементу аналізують за швидкістю

проникнення корозії в арматуру (за глибиною), середньою кількістю вогнищ корозії на 10 мм довжини зразка, максимальною глибиною вогнищ корозії і за середнім з п'яти найбільших значень глибини вогнищ корозії для всіх зразків.

Оцінюють окремо для лицевої і зворотної сторін арматури. Лицевою вважають сторону сталевого зразка з мінімальним захисним шаром бетону. Швидкість проникнення корозії в арматуру за глибиною, мм/рік:

$$P_h = h/T, \quad (7.21)$$

де  $h$  – глибина вогнищ корозії, мм.

Оцінка за відносною площею корозійних руйнувань сталі.

Її застосовують для сталевих пластин і дроту. Результати оцінюються відповідно з ГОСТ 13819-68 "Корозія металів. Десятибальна шкала корозійної стійкості".

Відносну площу корозійних руйнувань сталі визначають виміром площ на пластинах за допомогою мікроскопа з координатною сіткою або довжини вогнищ корозії на пластині (дроті) з допомогою мікроскопа з інтегральним столиком.

Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за величиною показника, що характеризує відношення у відсотках:

- пошкодженої й оцінюваної поверхонь пластини;
- довжини вогнищ корозії до всієї довжини дроту або пластини.

### **Оцінка за глибиною нейтралізації бетону захисного шару.**

Глибину нейтралізації бетону визначають під час розколювання неармованих зразків або взяття проб на свіжій поверхні бетону. Суху поверхню попередньо змочують дистильованою або чистою водопровідною водою. Надлишок води вимочують фільтрувальним папером. На поверхню, що досліджується, з допомогою піпетки наносять 0,1 %-й розчин фенолфталеїну в етиловому спирті.

Бетон, що володіє захисними властивостями по відношенню до сталевій арматури, забарвлюється в яскраво-малиновий колір. Нейтралізований бетон, що не захищає сталь від корозії, зберігає сіре забарвлення.

Через хвилину з допомогою лупи з точністю до 0,1 мм вимірюють відстань від поверхні зразка до межі яскраво забарвленої зони в напрямі, нормальному до поверхні, що знаходилась під впливом середовища. Отримане значення є глибина нейтралізації бетону. При хвилястій межі забарвленої зони вимірюють мінімальну, максимальну і середню глибини нейтралізації.

Досліджувані зразки рекомендують фотографувати на кольо-

рову плівку.

За значенням глибини нейтралізації бетону, встановленим в різноманітні терміни досліджень, будують графік швидкості нейтралізації (глибина нейтралізації – час) і визначають час нейтралізації захисного шару бетону в армоцементі. Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за часом нейтралізації захисного шару бетону.

**Оцінка за швидкістю корозії дрібнозернистого бетону, визначеною лугуванням СаО.** За такою оцінкою визначають корозійну стійкість і довговічність бетону в армоцементі, в тому числі захищеному, за постійного впливу кислотної рідини корозійного середовища.

Використовують неармовані циліндричні або квадратні діаметром (стороною) 50...100 мм зразки. В квадратних кути округляють радіусом 5 мм. Бокові сторони захищають вологоізолювальним шаром, висушують та витримують у воді при повному зануренні протягом двох діб.

Досліджують у закритій скляній посудині з мішалкою. Зразок підвішується на нитці з інертного матеріалу в розчині кислоти. Періодично зі зниженням концентрації кислоти на 5... 10% його міняють.

Швидкість корозії дрібнозернистого бетону визначають за кількістю агресивних іонів (в перерахуванні на СаО), які прореагували за одиницю часу одиниці відкритої поверхні:

$$K = (V_0 C_0 - V_1 C_1) / tF, \quad (7.22)$$

де:  $V_0 = V_1$  – обсяг кислоти, мл;  $C_0, C_1$  – концентрація відповідно початкового і кінцевого розчинів кислоти в перерахуванні на СаО;  $t$  – час випробувань доби;  $F$  – поверхня розділу фаз, см<sup>2</sup>.

Корозійну стійкість дрібнозернистого бетону в армоцементі оцінюють за швидкістю корозії, яка утворилася до 28 доби іспитів.

**Оцінка за зміною маси армоцементу.** Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за зміною маси зразка, яка характеризує ступінь проникності дрібнозернистого бетону і захисного покриття або корозійних руйнувань. Зміну маси відносять до початкової маси зразка і виражають у відсотках.

Оцінка за зміною маси армоцементу не використовується для зразків зі сталевими пластинами і для таких, у яких періодично беруться проби. Зразки зважують на технічних вагах 1-го класу з точністю до 0,01г.

**Оцінка за газопроникненням армоцементу.** Така оцінка призначена для армоцементних зразків, армованих тонкою сталевією сіткою, в тому числі з захисними покриттями. При визначенні зміни газопроникнення армоцементу в часі в різних середовищах

виміри проводяться на зразках, що мають однакову вологість.

Газопроникність армоцементного зразка визначається відповідним приладом. Через зразок під тиском 4; 6; 8 і 11 атм. пропускають азот з балона. Обсяг газу, що пройшов через зразок за 60 с, заміряють газовим лічильником.

Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за коефіцієнтом газопроникнення, середнім з чотирьох замірів.

Коефіцієнт газопроникнення армоцементу  $K_2$  визначають на підставі закону Дарсі для фільтрації азоту:

$$K_2 = Q\lambda\mu 1000 / A(P_1 - P_2)t, \quad (7.23)$$

де:  $Q$  – об'єм азоту, що пройшов крізь зразок за 60 с, см<sup>3</sup>;  $\lambda$  – товщина армоцементу, см;  $\mu$  – в'язкість азоту, спз;  $A$  – площа зразка, см<sup>2</sup>;  $P_1$  – тиск азоту на зразок, атм;  $P_2$  – атмосферний тиск, атм;  $t$  – час фільтрації, с.

Коефіцієнти фільтрації за різноманітних тисків газу повніші збігатися. В іншому випадку слід усунути витікання газу.

### **Оцінка за електропровідністю захисного шару і покриттів.**

Таку оцінку і використовують для зразків з окремими дротинами.

Зразок підвішують па нитках з інертного матеріалу в 3%-му розчині чистого хлористого натрію, в металевій посудині.

Електропровідність захисного шару і покриття визначають за допомогою приладів. Вимірюють до різкого зниження опору, що свідчить про руйнування захисного покриття.

Корозійну стійкість армоцементу оцінюють за питомим електричним опором захисного шару бетону і покриття; часом до руйнування захисних покриттів.

Питомий електричний опір  $\rho$ , Ом/м<sup>2</sup>:

$$\rho = R/A, \quad (7.24)$$

де:  $R$  - електричний опір захисного шару, Ом;  $A$  – площа робочої поверхні армоцементу, м<sup>2</sup>.

**Дослідження водонепроникності армоцементу.** Водонепроникність армоцементу – це такий стан, коли під виливом води з однієї сторони на протилежній не спостерігається ознак просочування: струменів і капель, мокрих плям, потіння і т.ін. Показник практичної водонепроникності армоцементу  $H$  являє собою відношення тиску води  $P$  до товщини конструкції  $b$ , см:

$$H = P/b, \quad (7.25)$$

За фізичним змістом показник водонепроникності аналогічний градієнту напору (г. н.), що визначається відношенням висоти водяного стовпа до товщини конструкції.

Контрольний тиск  $P_\phi$ , кгс/см<sup>2</sup>, при дослідженні армоцементу на

водонепроникність, що забезпечує розрахункове значення показника практичної водонепроникності  $H_{B\phi}$ , визначається за формулою

$$P_{\phi} = K_E \cdot P_p, \quad (7.26)$$

де:  $P_p$  – максимальний робочий статичний напір, кгс/см<sup>2</sup>;  $K_E$  – коефіцієнт, що враховує особливості експлуатації конструкції.

Установка для випробування армоцементних зразків повинна створювати необхідний тиск води на робочу площу зразків і підтримувати його з точністю до +(5...10) %.

Тиск у приладі піднімається до заданого протягом 1...5 хв. Під контрольним тиском зразки витримують не менше 24 год. їх стан контролюють через певні проміжки часу, наприклад, через 1; 2; 4; 6; 12; 24 і 72 год після початку досліджень.

Контролюють стан зразків або візуально, виявляючи ознаки просочування з протилежної сторони, до якої підводять воду, або з допомогою електронних давачів, сигнальних чи записувальних приладів.

**Оцінка ступеня водонепроникності армоцементу.** Ступінь водонепроникності армоцементу визначають за показником його практичної непроникності для води.

Армоцемент вважають таким, що витримав іспит на водонепроникність, якщо під контрольним тиском, що відповідає заданому показнику практичної непроникності, на жодному зі зразків, що досліджуються впродовж 24 год, не буде виявлено ознак просочування.

## 7.7. Визначення механічних характеристик сталі

Найбільш широко із металів в будівництві використовують сталь – сплав заліза із вуглецем, у якому міститься до 2 % вуглецю.

Фізико-механічні властивості сталі визначають випробуванням на розтяг на розривних та універсальних випробувальних машинах всіх систем при відповідності їх нормам. Для випробувань використовують циліндричні зразки діаметром 3 мм і більше, а також плоскі товщиною 0,5 мм і більше. Початкова розрахункова довжина зразків [127, 128]:

$$l_0 = 5,65\sqrt{A_0}, \quad \text{– короткі; } l_0 = 11,3\sqrt{A_0}, \quad \text{– довгі,} \quad (7.27)$$

де  $A_0$  – початкова площа поперечного перерізу зразка після його розриву, мм<sup>2</sup>.

Рекомендується для випробувань використовувати короткі зразки. При випробуваннях циліндричних зразків основними є зразки з діаметром  $d_0 = 10$  мм.

До випробувань зразки заміряють не менше, ніж в трьох місцях (в середині та по краях робочої частини зразка). По найменшому з отриманих розмірів вираховують площу поперечного перерізу зразка.

Поведінку арматурної сталі в умовах розтягування можна проаналізувати за діаграмою розтягування (стискування). Діаграма розтягування (стискування) – крива співвідношення напружень і деформацій, що визначається при короткочасному «умовно-миттєвому» випробуванні на розтягування (стискування) за методикою ГОСТ 12004 (рис. 7.1). По відношенню до сталі використовують два види діаграми розтягування «умовну» і «істинну». В першому випадку напруження на всіх стадіях розтягування до розриву визначають, виходячи з початкової площі поперечного перерізу, в іншому – підраховують «істинні» напруження, виходячи з дійсної площі поперечного перерізу зразка, що змінюється в процесі його деформування.

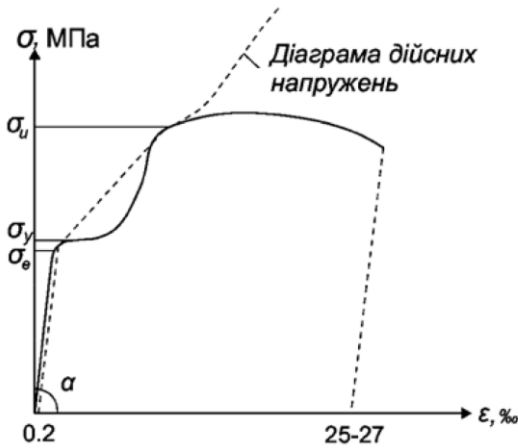


Рис. 7.1. Умовна діаграма роботи сталі на розтяг

Діаграма роботи сталі на розтяг « $\sigma$ – $\varepsilon$ », записана при випробуванні зразка з маловуглецевої сталі (див. рис. 7.1) показує, що на першій стадії роботи виникають пружні деформації. Вони характеризують прямий взаємний зв’язок між напруженнями та відносним видовженням, який відповідає відомому закону Гука:

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon, \quad (7.28)$$

де  $E_s$  – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис.

Границю пропорційності  $\sigma$  визначають безпосередньо за показами тензометра чи тензорезистора. Після закріплення зразка в захватах випробувальної машини і прикладання до нього навантаження, яке відповідає початковому напруженню (не більше 10% очікуваної границі пропорційності), на цьому зразку закріплюють тензометр чи тензорезистор.

Навантажують зразок повільно, ступенями: до значень, які скла-

дають 70–80% навантаження від очікуваної границі пропорційності зразок навантажують крупними ступенями, а потім навантаження здійснюють дрібними ступенями. Час витримки на кожному ступені повинен складати 5–7 с. Коли приріст подовження при малому ступені навантаження перевищує середнє значення приросту (при тому ж ступені навантаження) на початковій лінійній пружній ділянці у 2-3 рази, то визначення границі пропорційності вважають закінченим.

За результатами випробувань встановлюють навантаження  $N_{Ed}$ , при якому закінчується пружна робота сталі, і визначається границя пропорційності, МПа (Н/мм<sup>2</sup>) за формулою:

$$\sigma_e = \frac{N_{Ed}}{A_0} . \quad (7.29)$$

**Границю пружності**  $\sigma_{e1}$  визначають методом розвантаження. На дослідний зразок після його закріплення в захватах випробувальної машини і прикладання до нього навантаження, яке відповідає початковому напруженню  $\sigma_0$  (більше 20% очікуваної границі пружності  $\sigma_{e1}$ ) встановлюють тензометр чи тензорезистор. Потім зразок навантажують до напруження  $\sigma_1 = 2\sigma_0$  і після витримки на впродовж 5–7 с розвантажують до початкового напруження. Починаючи з 70–80% навантаження очікуваної границі пружності, зразок навантажують послідовно збільшуючи навантаження, вимірюючи кожен раз залишкове видовження після розвантаження до початкового напруження.

Випробування зупиняють, коли залишкове видовження при даному навантаженні перевищує заданий допуск. За результатами випробувань визначають навантаження  $N_{Ed,1}$ , яке відповідає заданому допуску залишкового видовження.

**Границя пружності** – напруження при якому починається незворотня пластична деформація, МПа (Н/мм<sup>2</sup>) вираховують за формулою:

$$\sigma_{e,1} = \frac{N_{Ed,1}}{A_0} . \quad (7.30)$$

Для високоміцних сталей визначають **умовну границю пружності** – напруження, при якому залишкові деформації зразка вперше досягають величини, яка відповідає певному допуску і може позначатися  $\sigma_{0,01}$ ;  $\sigma_{0,02}$ ;  $\sigma_{0,05}$ . Значення допуску встановлюють в межах від 0,005 до 0,1% залежно від призначення сталі, її властивостей і точності приладів.

Фізичну границю текучості –  $\sigma_y$ , МПа(Н/мм<sup>2</sup>) – вираховують



за формулою:

$$\sigma_y = \frac{N_{Ed,y}}{A_0}. \quad (7.31)$$

**Умовна границя текучості** –  $\sigma_{0,2}$ , МПа(Н/мм<sup>2</sup>) – це напруження при якому залишкова деформація досягає 0,2%, або умовна границя пружності з допуском на величину залишкової деформації, рівним 0,2%. Визначають умовну границю текучості за методикою аналогічною методиці для визначення границі пружності.

Умовну границю текучості знаходять за формулою:

$$\sigma_{0,2} = \frac{N_{Ed,0,2}}{A_0}. \quad (7.32)$$

**Тимчасовий опір** –  $\sigma_u$ , МПа(Н/мм<sup>2</sup>) – напруження, яке відповідає найбільшому навантаженню  $N_{Ed,u}$  перед руйнуванням, визначають розтягуванням зразка під дією плавноростаючого навантаження до руйнування.

Тимчасовий опір визначають за формулою:

$$\sigma_u = \frac{N_{Ed,u}}{A_0}. \quad (7.33)$$

**Відносне видовження після розриву** –  $\delta$ , % – зміна розрахункової довжини зразка, в межах якої відбувся розрив, у відсотках від початкової довжини. Величину знаходять за формулою:

$$\delta = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100}{l_0}. \quad (7.34)$$

Для визначення довжини розрахункової частини зразка після розриву  $l_k$  зруйновані частини зразка складають так щільно, щоб їх осі утворювали пряму лінію. Якщо після випробування в місці розриву утворюється зазор, обумовлений частковим викривленням металу чи іншими причинами, його включають в довжину розрахункової частини зразка після розриву.

## 7.8. Визначення механічних характеристик цегли керамічної

Для визначення відповідності звичайної глиняної цегли та її ефективних різновидностей вимогам державного стандарту треба перевірити її лінійні розміри по довжині, ширині та товщині (мм); оглянути, чи не викривлені грані та ребра і чи не відбиті або затуплені ребра та кути. Лінійні розміри перевіряють металевою лінійкою, а викривлення граней та ребер металевим кутником з точніс-

тю до 1 мм. Ступінь випалювання керамічних матеріалів перевіряють за кольором та звуком, порівнюючи дослідний зразок з еталоном. Ознаками недовипалювання є більш світлий колір та глухий звук при ударі. Про перевипалювання свідчить більш темний, у порівнянні з еталоном, колір та звук з металевим відтінком [127, 128].

**Границя міцності на стиск** визначається на гідравлічному пресі, точність якого повинна бути не нижче  $\pm 2\%$  не менше, ніж 5 зразків для кожної партії. Випробовують зразки, які складаються з двох цеглин, вкладених постелями одна на одну (рис. 7.2).

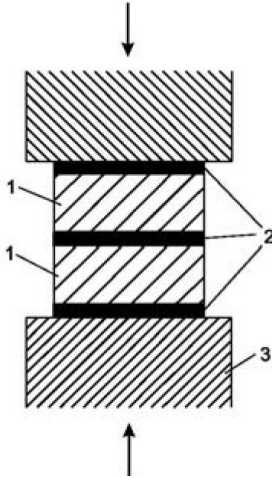


Рис. 7.2. Схема випробування цегли на стиск:

1 – дослідний зразок; 2 – шар цементного розчину; 3 – опорна плита пресу

Допускається випробовувати суцільну цеглу в зразках, які складаються з двох половинок, покладених одна на одну поверхні розпилу в протилежному напрямку. Перед приготуванням зразків цеглу опускають в воду не менше, ніж на 5 хвилин.

Цілу цеглу чи половинки з'єднують в зразки, а також вирівнюють їх верхні поверхні цементним розчином товщиною 3–5 мм. Для цементного розчину використовують портландцемент марки не нижче 400 та пісок крупністю не більше 1 мм у відношенні 1:1 по масі при В/Ц = 0,34–0,36. Зразки після виготовлення витримують не менше 3 дб при температурі повітря  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  та його відносній вологості 90–95%.

При необхідності термінового випробування опорні поверхні цегли вирівнюють шліфуванням. Замість шліфування допускається вирівнювати поверхні гіпсовим розчином. В останньому випадку допускається проводити випробування через 2 год. При визначенні границі міцності зразків із двох цілих цеглин товщиною 88 мм чи двох їх половинок результати множать на коефіцієнт 1,2, а зразків із шліфованими гранями – на 0,7.

Границя міцності при стиску  $R$  кожного зразка визначається за

формулою:

$$R = F/A, \quad (7.35)$$

де:  $F$  – навантаження, при якому зразок руйнувався, МПа,  $A$  – площа зразка, мм<sup>2</sup>.

**Границя міцності при згині** цегли визначають за методом випробування вільно лежачої на двох опорах балки, до якої в середині прольоту прикладено зосереджене навантаження (рис. 7.3). Як опори використовують сталеві циліндричні котки діаметром 20–30 мм.

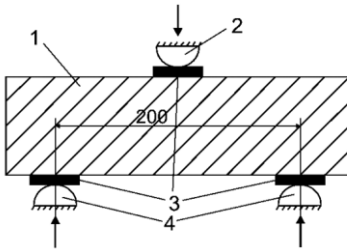


Рис. 7.3. Схема випробування цегли на згин:

1 – дослідний зразок; 2 – верхня плита преса; 3 – смуги цементного розчину; 4 – нижні опори преса

При випробуванні опори міцно закріплюють до нижньої плити преса. Руйнівне навантаження передається за допомогою ще одного сталевих котка чи сталеві призми, закріпленої до верхньої плити преса.

Щоб під час випробування зразки повністю опирались на сталеві опори і сприймали руйнуюче навантаження по всій ширині, на них наносять із свіжоприготовленого цементного розчину три вирівнювальні смужки шириною 20–30 мм. Дві з них розташовують на нижній постелі цегли (віддаль між осьовими лініями 200 мм), третю смужку – на протилежному боці постелі.

Зразки витримують у закритому приміщенні при температурі  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  упродовж трьох–чотирьох діб. Після цього заміряють ширину і товщину зразка посередині, вкладають вирівнювальними цементними смужками на опори призми і створюють навантаження зі швидкістю  $(50 \pm 0,5)$  Н/с до руйнування зразка.

Границя міцності при згині визначається за формулою:

$$R_{32} = 3F_{32}/(2bh^2), \quad (7.36)$$

де:  $F_{32}$  – навантаження руйнування зразка при згині, МПа;  $l$  – довжина прольоту між опорами, мм;  $b$  – ширина зразка, мм;  $h$  – висота (товщина) зразка, мм.

## 7.9. Визначення механічних характеристик деревини

Якість деревини, яка застосовується в будівництві, визначається породою дерева, його станом та властивостями, наявністю вад. Показники міцності деревини мають ті особливості, що деревина здатна здійснювати опір зовнішнім механічним діям, не однаковий у різних напрямках, внаслідок особливостей її структури. Анізотропність деревини необхідно враховувати при використанні

в будівельних конструкціях [40, 41, 128].

**Опір деревини стиску вздовж волокон** визначають на зразках у формі прямокутних призм з основою 20x20 мм і довжиною 30 мм, завантажуючи їх на випробувальних машинах з точністю вимірювання випробувального навантаження до 1%.

Границя міцності деревини при стиску вздовж волокон  $R_w$  – для зразків, які мають на момент випробування вологості  $W$ , враховують з точністю до 0,5 МПа за формулою:

$$R_w = N_{Ed}^{\max} / (ab), \quad (7.37)$$

де:  $N_{Ed}^{\max}$  – максимальне навантаження, Н;  $a$  та  $b$  розміри поперечного перерізу зразка, см.

Границю міцності  $R_w$  зразка перераховують на міцність при вологості 12% за формулами:

– для зразків з вологістю менше границі гігроскопічності

$$R_{12} = R_w [1 + \alpha (W - 12)], \quad (7.38)$$

де  $\alpha$  – поправочний коефіцієнт, рівний 0,04 на 1% вологості;

– для зразків з вологістю, рівною чи більшою границі гігроскопічності

$$R_{12} = R_w K_{12}^{30}, \quad (7.39)$$

де  $K_{12}^{30}$  – коефіцієнт перерахунку при вологості 30%, залежить від породи дерева.

**Опір деревини стиску поперек волокон** визначають, випробовуючи деревину по радіальній тангенціальній площі на зразках 20x20x30 мм. Для виконання цього випробування застосовують машину з пристроєм для запису навантаження не більше 50 Н/мм і деформацією зразка з масштабом не більше 0,01 мм.

Ширину і довжину зразків вимірюють з точністю до 0,1 мм на середині ширини і довжини зразка. Зразок розташовують в машині так, щоб навантаження прикладалося до тангенціальної площини при тангенціальному стиску і навантажують рівномірно зі швидкістю (1000±200) Н/хв при одночасній реєстрації навантаження запишуваним пристроєм. Навантажують зразок до очевидного перевищення умовної границі міцності, що помітно за збільшенням деформування зразка чи за діаграмою стиску.

Навантаження  $N$ , яке відповідає умовній границі міцності, визначають за діаграмою «навантаження-деформація» стиску поперек волокон як ординату точки, в якій відхилення від лінійної залежності між навантаженням і деформацією досягне такої величини, що тангенс кута, утвореного віссю навантаження і дотичною до графіка  $P - \Delta l$ , збільшується на 50% свого значення, яке ві-

дповідає прямолінійній ділянці.

Границю міцності  $R_w$  зразка з вологістю  $W$  в момент випробувань знаходять з точністю до 0,1 МПа за формулою:

$$R_w = N_{Ed} / (b \cdot l), \quad (7.40)$$

де:  $N_{Ed}$  – навантаження, яке відповідає границі міцності, Н;  $b$  і  $l$  – ширина і довжина зразка, см.

При цьому необхідну границю міцності  $R_w$  зразка з вологістю  $W$ , % перерахувати до вологості 12% з точністю до 0,1 МПа за формулою:

$$R_{12} = R_w [1 + \alpha (W - 12)], \quad (7.41)$$

де  $\alpha$  – поправочний коефіцієнт, рівний 0,035 на 1%.

Границю міцності  $R_w$  зразка з вологістю, рівною чи більшою границі гігроскопічності, перераховують до міцності при вологості 12% за формулою:

$$R_{12} = R_w K_{12}^{30}, \quad (7.42)$$

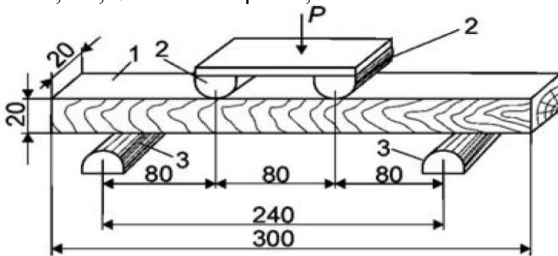
де  $K_{12}^{30}$  – коефіцієнт перерахунку при вологості 30%, залежить від породи деревини і напрямку стиску.

**Границю міцності при статичному згині** деревини визначають на зразках у виді прямокутних брусків з основою 20x20 мм і довжиною вздовж волокон 300 мм. При випробуванні зразки встановлюють, як показано на *рис. 7.4*.

Зразок завантажують рівномірно зі швидкістю  $(7 \pm 1,5)$  кН/хв. Границю міцності деревини при кондиціюванні зразків при навантаженні за схемою *рис. 7.4*, знаходять до 1 МПа за формулою

$$R_w = N_{Ed}^{max} l / (bh^2), \quad (7.43)$$

де:  $N_{Ed}^{max}$  – руйнівне навантаження, Н;  $l$  – відстань між опорами, см;  $b$  – ширина зразка, см;  $h$  – висота зразка, см.



*Рис. 7.4.* Схема установки зразка деревини при випробуванні на статичний згин:

1 – зразок; 2 – верхні опори;  
3 – нижні опори

Границю міцності зразків перераховують до вологості 12% з точністю до 1 МПа за формулами:

– для зразків з вологістю менше границі гігроскопічності

$$R_{12} = R_w [1 + \alpha (W - 12)], \quad (7.44)$$

де  $\alpha$  – поправочний коефіцієнт на вологості, рівний 0,04 для всіх порід деревини;

– для зразків з вологістю, рівною чи більшою границі гігро-

скопичності:

$$R_{12} = R_w K_{12}^{30}, \quad (7.45)$$

де  $K_{12}^{30}$  – коефіцієнт перерахунку при вологості 30%, залежить від породи деревини.

Опір деревини розтягу вздовж і поперек волокон визначають також вздовж і поперек волокон на зразках точно встановлених розмірів (рис. 7.5).

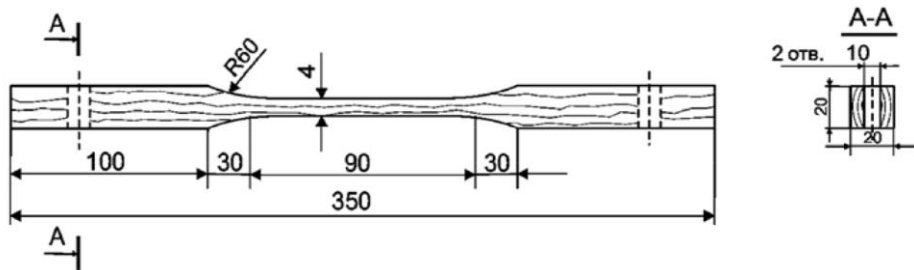


Рис. 7.5. Форма і розміри зразка для випробування на розтяг вздовж волокон

Границю міцності  $R_w$  з вологістю  $W$  в момент випробувань визначають з точністю до 0,1 МПа за формулою

$$R_w = N_{Ed}^{max} / (bl), \quad (7.46)$$

де:  $N_{Ed}^{max}$  – максимальне навантаження, Н;  $b$  і  $l$  – розміри поперечного перерізу робочої частини зразка, см.

Приведення до міцності при вологості 12% виконується аналогічно до описаних вище випробувань деревини.

Твердість деревини різних поверхонь відрізняється навіть для однієї породи, тому її вимірюють в трьох площинах: торцевій, радіальній і тангенціальній.

Статичну твердість деревини визначають на випробувальній машині з точністю вимірювання навантаження 50 Н. При випробуванні пуансон вдавлюється почергово в середину випробовуваної поверхні на глибину радіуса на півсфери (5,64 мм) з рівномірною швидкістю ( $2 \pm 0,5$  м/с). При досягненні вказаної глибини вдавлювання пуансона у зразок по силувимірювачу машини фіксується навантаження з точністю до 50 Н. Це навантаження  $T_w$  є характеристикою твердості деревини при вологості в момент випробувань.

Твердість  $T_w$  при вологості зразка  $W$  приводять до нормальної вологості 12% з точністю до 0,5 МПа за формулою

$$T_{12} = T_w \cdot K, \quad (7.47)$$

де  $K$  – коефіцієнт перерахунку із врахуванням вологості.

## 7.10. Висновки до розділу 7

На основі багаторічних досліджень та випробувань і аналізу науково-технічних джерел з проблем фізико-механічних характеристик бетону, залізобетону та інших будівельних матеріалів, зокрема, тривалих випробувань конструкцій і споруд, стандартизовано зразки та способи їх виготовлення, опрацьовано і удосканалено обладнання та засоби підготовки і проведення випробувань зразків. Обробка результатів випробувань визначення міцності, деформаційних та структурно-механічних характеристик бетону, визначення довговічності армоцементу, механічних характеристик сталі, цегли і деревини, це дало можливість зробити в цьому розділі такі висновки:

1. На основі багаточисельних випробувань та аналізу науково-технічних джерел стандартизовані зразки та способи їх виготовлення. Зокрема, досліджено вплив масштабного фактору, границя міцності на стиск, гарантована міцність заданого нормами класу бетону, встановлено допуски при виготовленні зразків, ступінь ущільнення бетонної суміші і інші чинники, вимоги до зразків.

2. Багаторічний досвід використання бетону і залізобетонних конструкцій дав можливість стандартизувати обладнання, прилади і засоби для дослідження бетонних та залізобетонних зразків і конструкцій. Сформульовано вимоги до обладнання та приладів, які використовуються при дослідженні міцності, тріщиностійкості та деформацій. Детально описано підготовку зразків до випробувань та встановлені допустимі відхилення при проведенні випробувань. Зокрема, визначення деформації усадки бетону, повзучості при навантаженні та визначення деформації післядії.

3. Стандартизовано методи та засоби обробки результатів випробувань, визначення міцності, тріщиностійкості і деформаційних та структурно-механічних характеристик бетону. Зокрема, визначення довговічності армоцементу де сформульовано основні фактори, що впливають на корозійну стійкість – це візуальна оцінка, за корозійним руйнуванням окремих дротин, за глибиною вогнищ корозії сталі, за глибиною нейтралізації захисного шару, за швидкістю корозії визначеною лугуванням СаО, за зміною маси армоцементу, за газопроникненням за водонепроникності армоцементу, та оцінкою ступеня водонепроникності армоцементу.

4. Постійні дослідження та випробування дали змогу визначити механічні характеристики сталі. Зокрема такі: стандартизувати

зразки для дослідження властивостей арматури, встановлення границі пружності, умовну границю текучості для високоміцних сталей, тимчасовий опір, відносне видовження після розриву.

5. Розглянуто і описано методику визначення механічних характеристик цегли керамічної. Зокрема, встановлено границі міцності на стиск та границі міцності при згині та представлено схеми випробування на стиск і згин.

6. Сформульовано і описано методику визначення механічних характеристик деревини. Зокрема, встановлення опору деревини при стиску вздовж волокон та опір деревини стиску поперек волокон, границю міцності при статичному згині. Описано і наведено схеми установки зразка деревини при випробуванні на статичний згин та форму і розміри зразка при випробуванні та розтяг вздовж волокон.



## **8. Визначення характеристик тріщиностійкості бетонів**

### **8.1. Мета, завдання та науковий рівень методичних рекомендацій**

Сучасні оцінки міцності різноманітних бетонних та залізобетонних конструкцій базуються на методах механіки крихкого руйнування [167]. Ці методи полягають у визначенні граничних розмірів тріщин (дефекту), за яких допускається безаварійна експлуатація будівельних конструкцій. Використання механіки руйнування в практичних розрахунках реальних будівельних конструкцій та матеріалів неможливе без встановлення та регламентації їх характеристик тріщиностійкості: силових, енергетичних та деформаційних [77, 101, 121, 166, 245].

Методичні рекомендації [166] поширюються на всі види бетонів серійного будівельного виробництва України, встановлюють методи механічних випробувань для визначення характеристик тріщиностійкості бетонів під короткочасними статичними навантаженнями спеціальних зразків. Характеристики відповідають в основному руйнуванню бетону нормальним відривом берегів тріщин, але в окремих випадках розглядається методика для вивчення характеристик під час поперечного та поздовжнього зсувів. Слід зауважити, що сучасні досягнення механіки руйнування дають потенційну можливість розглядати тріщиностійкість бетону як фізико-механічну характеристику, що використовується для визначення міцності елементів конструкції. Ряд явищ, які стосуються поведінки бетону під час дії навантажень (силовій, температурній і ін.), свідчать на користь застосування критеріїв механіки руйнування в оцінці його фізико-механічних властивостей [103, 166]:

- тріщини в основному виникають через крихкість затверділого цементного тіла;
- міцність під час розтягу бетону рівна приблизно  $1/10$  від його міцності при стиску, що є достатньо близьким до відношення  $1/8$  в теорії Гріффіста для крихких матеріалів;
- інтенсивність напружень на продовженні тріщини, а також на границі розділу цемент-заповнювач може перевищувати локальну теоретичну міцність в цих областях;
- всі дослідження свідчать про зміну міцності бетонних зразків після довготривалих навантажень;
- розгалуження тріщини в багатьох випадках можна розглядати як зону передруйнування в області вершини тріщини, якщо тільки

воно обмежене невеликою областю порівняно із розмірами зразка та тріщини.

**Мета і завдання розробки методичних рекомендацій.** Мета цих методичних рекомендацій – створити нові стандартизовані методи визначення тріщиностійкості (в'язкості руйнування) бетонів.

Їх завдання – встановити методи визначення комплексу силових і енергетичних характеристик тріщиностійкості, що дасть змогу оптимізувати технологічні процеси виготовлення та контролювати якість бетону, вдосконалити розрахунки конструкцій з урахуванням їх реальної дефектності, геометричних форм і умов експлуатації, регламентувати характеристики тріщиностійкості бетонів та методи їх визначення, забезпечити єдиний підхід в дослідженнях тріщиностійкості бетону та залізобетону.

**Характеристика методів стандартизації.** Об'єктом стандартизації є методи визначення характеристик тріщиностійкості (в'язкості руйнування) і діаграм стану матеріалів.

Розроблений метод визначення базових характеристик, що комплексно оцінюють тріщиностійкість (в'язкість руйнування) бетону, ґрунтується на вимірюванні навантаження, яке сприймається зразком (а не системою машина-зразок), і його деформацій у строго фіксованому перерізі (локальному об'ємі зони передруйнування) в процесі короткочасного статичного навантаження.

Вимірюють за допомогою стандартизованої апаратури: електронного довгоміра (модель 217) з механотропним давачем (виробництво з-ду “Калібр”) – для вимірювання деформацій; силовимірювального штока з тензодавачами опору типу ПКБ – для навантаження; самописців моделі Н-307 з живленням від електромережі – для реєстрації.

Механічна частина пристрою виготовляється будь-яким машино-будівельним підприємством за кресленнями Експериментального об'єднання “Реконструкція” МНІАЕСК (Росія). Установка в комплекті випускається дослідним виробництвом Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України.

Єдність вимірювань та ідентичність результатів контролю якості конструкції для замовника гарантується серійною апаратурою, до якої відноситься:

- силовимірювальний шток системи ШС-3 Експериментального виробничого об'єднання “Реконструкція”;
- індивідуальне джерело струму типу акумуляторної батареї;
- механотронний давач (модель 217), виготовлений НВО “Калібр” (Москва);

– реєструвальна апаратура - стандартний самописець Н-307, виготовлений НВО “Прилад”.

Міцність і деформаційні характеристики бетону визначають, випробовуючи не менше трьох зразків із бетону досліджуваного виду згідно з ДСТ 10180-69, ДСТ 24452-80.

Статичний контроль міцності бетону повинен відповідати вимогам НСО-3207-75, ДСТ 108105-86, а випробувальні машини і установки для тарування показів приладів – ДСТ 7855-84.

Термінологія, використана у методичних рекомендаціях, відповідає ДСТ 25.506-85 [48], ІСО 31 3-78, ІСО 31 13-81. Терміни, визначення і позначення, одиниці виміру характеристик бетону з урахуванням концепції механіки руйнування наведені раніше [166].

У *табл. 8.1.* подано позначення і одиниці виміру величин, терміни, використані у методичних рекомендаціях, і пояснення до них, способи визначення характеристик тріщипостійкості під час рівноважних випробувань, міцності бетону, модуля пружності.

**Науково-технічний рівень методичних рекомендацій.** Вперше у галузі будівництва в рамках концепції механіки руйнування до бетону застосовано принципово нову методологію так звану рівноважних (з використанням закону збереження енергії) механічних випробувань з побудовою повної діаграми стану бетону. Подібний документ [166] розроблено в Україні вперше. За кордоном аналогічні міжнародні стандарти на бетони відсутні, на час розробки даних методичних рекомендацій розглядаються їх проекти.

В результаті інформаційного пошуку встановлено існування рекомендованих документів для методів визначення характеристик тріщиностійкості бетонів і інших конгломератів, а також металевих матеріалів. За кордоном ці рекомендації РИЛЕМ “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of bend tests on notched beams”, 1985.

Опубліковані в США, Канаді, Японії, Індії, Німеччині, Швейцарії, Італії й інших країнах результати досліджень (наприклад: A Hillerborg “Result of three comparative test series for determining energy G of concrete materials and structures. 1985. – F.18. – № 107) свідчать про підвищений інтерес до методів оцінки тріщиностійкості і пошуки практичного використання нових розробок.

Методичні рекомендації розповсюджуються на бетони важкі і легкі, щільні, силікатні і пористі, на полімерних та комплексних багатоконпонентних в’язучих, збірні і монолітні бетонні і залізобетонні вироби, конструкції і споруди (крім бетонів марки С15 і нижче).

До початку розробки методичних рекомендацій в СРСР діяла методика виконання вимірювань (МВ) Держстандарту СРСР “Характеристики тріщиностійкості (в’язкості руйнування) при статичному навантаженні” (Москва, видавництво стандартів, 1989); за кодоном – рекомендації RILEM “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of bend test on notched beams” (1985).

Характеристики тріщиностійкості - квазістатичний  $K_I$  і критичний  $K_{Ic}$  коефіцієнти інтенсивності напружень;  $G_I$  – питомі енерговитрати на ініціювання квазістатичного руйнування;  $J_i$  – джейн-інтеграл;  $\chi$  – критерій крихкості та ін. Вказані характеристики, отримані згідно з методичними рекомендаціями, інваріантні (незалежні) відносно різних умов випробування і таким чином визначають дійсні властивості матеріалів.

Параметри тріщиностійкості бетону встановлюють у зв’язку із потребами народного господарства, спрямованими на підвищення якості бетону, виробів і конструкцій із нього на основі результатів випробувань партій дослідних зразків стандартизованої продукції.

На практиці для оцінки якості бетону на окремих заводах вживають характеристики тріщиностійкості, отримані за допомогою пристроїв за авторським свідоцтвами А. с. № 1375989, А. с. № 1283595 та ін.

Методичні рекомендації складаються зі вступу, в якому вказується область розповсюдження цих рекомендацій, умови використання отриманих характеристик, п’яти розділів, що містять регламентовані методи, технічні вимоги до визначення характеристик тріщиностійкості бетону під час рівноважних випробувань, семи додатків та списку літератури. Вони встановлюють вимоги до методів підготовки зразків, випробувального обладнання, методології обробки результатів з визначенням комплексу характеристик тріщиностійкості бетону.

У пункті 2 і 3 описано положення та зразки, подано рекомендації для визначення згаданих характеристик під час рівноважних випробувань зразків з фіксацією магістральної тріщини, що росте, і відповідних біжучих значень прикладеного навантаження.

У пункті 8.4 наведено характеристики обладнання для рівноважних випробувань, та розглянуто схему комутації апаратури для фіксування діаграми.

У пункті 8.7 наведено рекомендації для визначення міцності бетону на розтяг і модуля пружності під час рівноважних випробувань зразків.

У розробці методичних рекомендацій використано й узгоджено вимоги до вітчизняних, зарубіжних і міжнародних стандартів,

методологічних документів і публікацій щодо проблем тріщино-стійкості конструкційних матеріалів.

Відповідно до вимог ДСТ 1.2-85 результати аналізу науково-технічного рівня методичних рекомендацій оформляється у вигляді таблиці порівняння. Для цього проаналізовано вітчизняний і зарубіжний досвід методів оцінки характеристик тріщиностійкості, міцності та деформацій за нерівноважними і рівноважними схемами випробувань.

Огляд зарубіжного досвіду показав, що найсучасніші розробки методів перевірки якості бетону у будівництві ґрунтуються на принципах руйнівного або неруйнівного контролю.

Пошук аналогів функціональних ознак в області методів вимірювань властивостей бетону, які характеризують якість і довговічність, виконано за такими параметрами:

- глибина пошуку 50 років;
- фонд ВПТВ, науково-дослідний звіт про виконання пошукової теми ВОЛГІБІ і ВНДІГ, “Оргенергобут”;
- опис відкриттів до авторських свідоцтв і патентів СРСР з фонду Патентної бібліотеки, опис відкриттів до патентів США, Франції, Великобританії, Німеччини, Швейцарії, Японії та ін.;
- реферативний журнал “Изобретения в СССР и за рубежом” з 1975 по 1992 рр.

Розглянуті такі аналоги:

1. RILEM “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of bend test on notched beams”, Amsterdam, 1985.

2. МИ-89 “Характеристики тріщиностійкості (в’язкості руйнування) при статичному навантаженні”. – Держстандарт СРСР, 1989.

3. ДСТ 25.306-85 “Розрахунки і випробовування на міцність. Методи механічних випробувань матеріалів. Визначення характеристик тріщиностійкості (в’язкості руйнування) при статичному навантаженні.

Вибрано такі найсуттєвіші показники порівняння:

– призначення (область застосування для різних цілей розв’язуваних задач, склад конгломератів, за варіаціями пружності, локального деформування крихкості);

– економічний показник, що характеризує витрати на контроль параметрів міцності і тріщиностійкості на один зразок.

Таким чином, науково-технічний рівень розглянутих методичних рекомендацій визначення характеристик тріщиностійкості (в’язкості руйнування) під статичним “навантаженням” вищий від

світових. Основні положення, захищені авторськими свідоцтвами № 1375889 і № 1283595, відрізняються принципово новими науково-технічними рішеннями, які дають змогу вплинути на якість тестування бетону, знизити економічні витрати на створення бетонів підвищеної довговічності, знизити витрати на ремонт і оновлення основних фондів народного господарства.

## 8.2. Загальні положення та зразки

8.2.1. Позначення та одиниці величин, які використовуються в методичних рекомендаціях, наведено в обов'язковій *табл. 8.1*.

*Таблиця 8.1*

Розміри, мм  $d_{ам}$ , мм	Тип 1		Тип 2		Тип 3		Тип 4	
	$b$	$a_0$	$b$	$a_0$	$b$	$a_0$	$D$	$a_0$
менше 1,25	40	10	40	15	40	10	100	30
1,25...5,0	70	25	70	25	70	15	100	30
5,0...10,0	100	35	100	45	100	25	100	30
10,0...20,0	150	50	150	60	100	25	200	60
20,0...40,0	200	70	200	90	-	-	200	60
40,0...60,0	300	100	300	120	-	-	400	120
60,0...80,0	400	140	400	160	-	-	400	120

8.2.2. Характеристики тріщиностійкості визначають під час рівноважних і нерівноважних механічних випробовувань.

У рівноважних поетапно змінюють навантаження до внутрішніх сил опору матеріалу під час кожного дискретного приросту магістральної тріщини на стадії локального деформування зразка з відповідним квазістатичним розвитком магістральної тріщини.

Нерівноважні випробовування характеризуються втратою стійкості деформування зразка в момент локалізації деформації після досягнення максимального навантаження з наступним квазістатичним розвитком магістральної тріщини.

8.2.3. Для визначення характеристик тріщиностійкості випробовують зразки 1-7 (*рис. 8.1-8.7*).

Під час рівноважних випробовувань записують діаграму  $F-V$ ; під час нерівноважних – фіксують  $F_c$ .

У разі змішаного руйнування (I+III), коли одночасно зміщуються береги тріщини відриву і повздовжнього зсуву, записують діаграми  $F-V$  і  $M-W$ .

Допускається визначати характеристики тріщиностійкості під час

рівноважних випробувань зразків (з попередньо утвореними магістральними тріщинами або отворами), фіксуючи розміри магістральної тріщини, яка розвивається, і відповідні поточні значення навантаження.

8.2.4. За результатами досліджень знаходять такі основні сили – в термінах коефіцієнтів інтенсивності напружень ( $K$ ), й енергетичні - в термінах питомих енерговитрат ( $G$  і  $J$  – інтегралів), характеристики тріщиностійкості  $K_I$ ,  $K_{IC}$ ,  $K_{IIIc}$ ,  $K_C$ ,  $K_I$ . Величини визначають згідно з поданими рекомендаціями.

### 8.3. Зразки

8.3.1. Для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань використовують зразки типу 1 – призма квадратного поперечного перерізу для випробувань на зосереджений згин (рис. 8.1, а також зразки типу 7 для визначення гранично-рівноважного етапу під час одночасного розтягу і закруту циліндричного зразка (рис. 8.7).

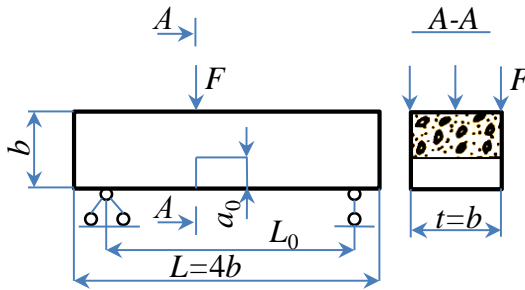


Рис. 8.1. Балковий зразок для випробування

8.3.2. Для визначення характеристик тріщипостійкості у нерівноважних випробуваннях застосовують такі зразки: тип 1 (рис. 8.1); тип 2 – призма квадратного поперечного перерізу для випробувань на основний розтяг (рис. 8.2); тип 3 – куб для випробувань на позacentровий стиск (рис. 8.3); тип 4 – циліндр для випробувань на розтяг при розколюванні (рис. 8.4).

8.3.3. Розміри і схеми навантаження зразків показано на рис. 8.1–8.4. Мінімальні розміри зразків і довжину ініційованих магістральних тріщин беруть з табл. 8.1 залежно від  $d_{am}$ .

8.3.4. Ініційовані магістральні тріщини наносять за допомогою механічного алмазного різального інструменту або під час формування зразка шляхом закладання змащеної фольги або латунної (металевої) пластини. Ширина ініційованих магістральних тріщин не повинна перевищувати  $0,5 d_{am}$ , але не більше 2 мм.

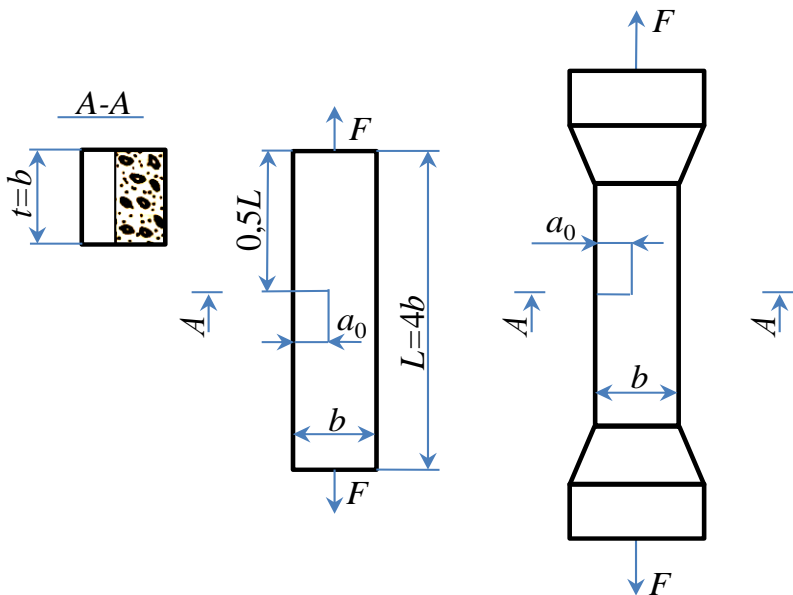


Рис. 8.2. Зразки для випробування на розтяг

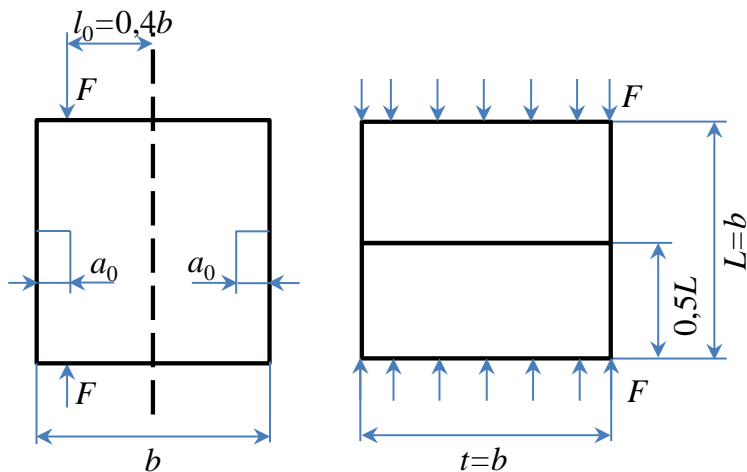


Рис. 8.3. Зразок для випробування на стиск з надрізом

8.3.5. Зразки виготовляють згідно з ДСТ 10180 із бетонної суміші серіями не менше, як чотири зразки-близнюки, або вирізають (випилюють) із виробів, конструкцій, споруд згідно з ДСТ 28570.

8.3.6. Для виготовлення зразків використовують форми згідно з ДСТ 22685 і обладнання згідно з ДСТ 10180.

Умови тверднення зразків після виготовлення повинні бути встановлені нормативним документом, який регламентує правила



контролю якості. Якщо вони не визначені, тоді їх приймають нормальними згідно з ДСТ 10180.

## 8.4. Обладнання, проведення випробувань та обробка результатів

### 8.4.1. Обладнання та випробування

8.4.1. Для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків типу 1 використовують обладнання згідно з обов'язковим додатком 5; під час експерименту необхідно забезпечити неперервне двокоординатне записування діаграми  $F-V$  з кінцевою похибкою, не більшою від одного відсотка відповідно до схеми комутації апаратури (рис. 8.11).

Для визначення характеристик гранично-рівноважного стану при одночасному розтязі з закрутом (I-III) використовують випробувальне обладнання згідно з рис. 8.6. Під час деформування зразка неперервно записують з допомогою двох приладів діаграми  $F-V$  і  $M-W$ .

8.4.2. Для визначення характеристик тріщиностійкості під час нерівноважних випробувань зразків типу 1-4 використовують випробувальні машини й обладнання згідно з ДСТ 10180, метрологічні характеристики яких відповідають ДСТУ 7855.

8.4.3. У випробуваннях зразків типу 1 одна з опор (валик) повинна забезпечувати вільне горизонтальне переміщення зразка вздовж його осі, друга (шарнір) - вільний поворот зразка в двох взаємно перпендикулярних площинах.

У випробуваннях зразків типу 7 необхідно забезпечувати співвісне прикладення зусиль (кульову опору) і крутного моменту.

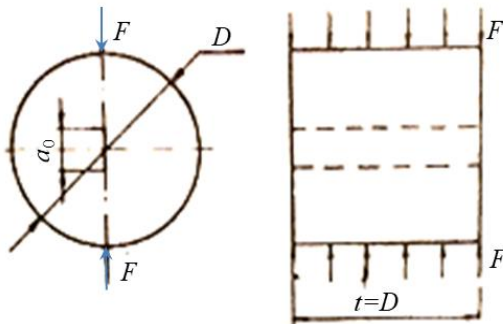


Рис. 8.4. Дисковий зразок з тріщиною на стиск

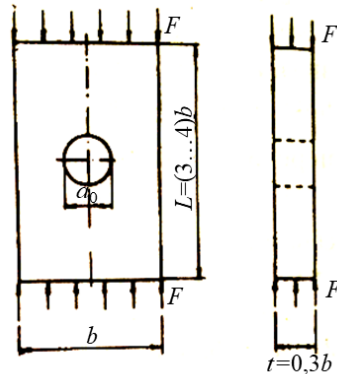


Рис. 8.5. Прямокутний зразок з отвором для випробування на стиск

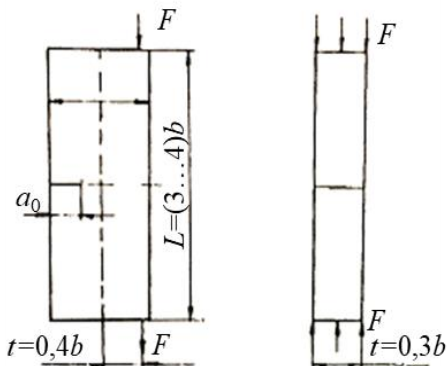


Рис. 8.6. Прямокутний зразок з надрізом на позacentровий стиск

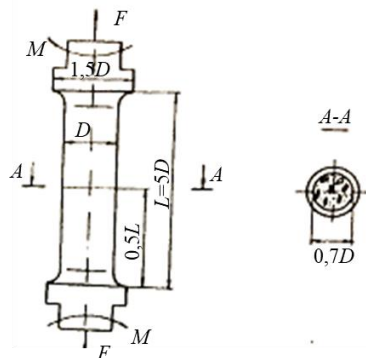


Рис. 8.7. Круглий зразок для випробування на розтяг і закрут

## 8.5. Проведення випробувань

8.5.1. Під час випробувань температура навколишнього середовища повинна бути  $20 \pm 5$  °С, відносна вологість – не нижче 50%. Для бетону відповідальних споруд, що експлуатуються в умовах значних змін температур (понад 40 °С) випробовувати слід згідно з вимогами методики визначення кліматичної тріщиностійкості.

Коливання температури під час вимірювань не повинна перевищувати 2 °С, а вологість – 3%.

8.5.2. Лінійні розміри зразків вимірюють з похибкою, не більшою 1 мм, їхні переміщення – 0,001 мм, а зусилля, що діє на зразок, - з похибкою не більше 1% від вимірювального найбільшого зусилля.

8.5.3. Перед початком випробувань потрібно здійснити два рази навантаження – розвантаження зусилля, яке складає 10% від очікуваного найбільшого навантаження.

8.5.4. Швидкість навантаження зразків встановлюють за швидкістю переміщення навантажувальної плити в межах від 0,001 до 0,2 мм/с, при цьому час випробувань повинен становити від 1 до 4 хв.

8.5.5. Під час рівноважних випробувань зразків типу 1 навантажують неперервно на стадіях пружного і локального деформування в умовах квазістатичного розвитку магістральної тріщини до їх фрагментації з фіксуванням повної машинної діаграми деформування матеріалу  $F-V$  (рис. 8.8, крива 5TCDA).

8.5.6. У нерівноважних випробуваннях зразків типів 1–4 навантажують неперервно аж до їх квазістатичної фрагментації з фіксацією величини  $F$ .

8.5.7. Зразки типу 7 ділять на партії, з яких одну випробовують крученням, другу розтягом. Змішане руйнування реалізують закрутом зразків до різних рівнів (0,2; 0,3; 0,4; 0,5)  $K_{III}$  з наступним розтягом. За діаграмами руйнування визначають  $F_c$  і  $M_c$ .

## 8.6. Обробка результатів випробувань

Обробка результатів випробування виконувалось згідно праць [124, 125 і ін.].

8.6.1. Характеристики тріщиностійкості визначають за результатами рівноважних випробувань зразків типу 1;

8.6.1.1. Машинну діаграму (крива  $STCXDA$ ) перетворюють у розрахункову і виконують додаткові побудови (рис.8.8):

– точку  $S$  по пружній лінії  $ST$  переносять у положення точки  $D$  на величину  $F_s$ , яка відкладається на осі  $F$ , рівну

$$F_s = \left[ m_1 \left( \frac{L_0}{L} \right) + m_2 \right] g; \quad (8.1)$$

– відновлюють осі  $OF$  і  $OV$ , паралельні відповідно  $SF$  і  $CV$ ;  
 – з початку прямолінійної спадної ділянки машинної діаграми, тобто із точки  $D$ , де виконується умова  $dF/dV = \text{const}$ , по лінії розвантаження відтворюють відрізок  $DD^*$  до перетину з віссю  $OV$ ;

– фіксують розрахункову діаграму  $OSTCX DD^*$ ;  
 – із точки  $C$  опускають перпендикуляр  $CH$  до осі  $OV$  і лінію, паралельну до пружної лінії  $OT$ ;

– визначають величину відрізка  $OM$  із виразу

$$V = V_e \frac{1 + 2,8\varphi}{1 + 2,8\varphi^2 + 64 \left[ \left( \frac{\lambda}{1-\lambda} \right)^2 (5,58 - 19,57\lambda + 36,82\lambda^2 - 39,94\lambda^3 + 12,11\lambda^4) \right]}; \quad (8.2)$$

– із точки  $M$  опускають перпендикуляр  $M^c_{сн}$  до осі  $OV$  до перетину з лінією  $CC'$  паралельною до осі  $OV$ . Точку  $0$  з'єднують з точкою  $CC'$ , відрізком  $CC'$ ;

– із розрахункової повної діаграми побудовою виділяють повну пружну діаграму  $OSTOX'O$ , для чого використовують напрямки ліній розвантаження, наприклад, точка розвантаження  $X$  переродиться до лінії, паралельної до осі  $OV$ , у положення  $X'$  на величину, рівну  $V_x$ .

8.6.1.2. Чисельно або планіметруванням визначають енерговитрати на окремі етапи деформування і руйнування зразка, а саме  $W_m, W_l, W_t, W_{ce}$  – числово рівні площам фігур.



$$K_C^* = \frac{F_C^*}{D^{1/2}t} \sqrt{\frac{2\left(\frac{a_0}{D}\right)}{\pi\left[1-\frac{a_0}{D}\right]}}; \quad (8.7)$$

– під час випробувань зразка типу 7

$$K_{IC} = \frac{\sqrt{2}F_e(1-\varepsilon)^{0.5}}{D\sqrt{\pi d}} \left[ 1 - 0,5\varepsilon - 0,125\varepsilon^2 - 0,257\varepsilon^3 - 0,2082\varepsilon^4 + \right]^{-1} \left[ 0,0663\varepsilon^5 + 0,0048\varepsilon^6 + 0,013\varepsilon^7 + 0\varepsilon^8 \right], \quad (8.8)$$

$$K_{IIIc} = \frac{6M_c(1-\varepsilon)^{0.5}}{\sqrt{2\pi DD^2\varepsilon^2}\sqrt{\varepsilon}} \left[ 1 - 0,5\varepsilon - 0,125\varepsilon^2 - 0,0625\varepsilon^3 - 0,039\varepsilon^4 + \right]^{-1} \left[ 0,2327\varepsilon^5 + 0,1505\varepsilon^6 + 0,013\varepsilon^7 + 0\varepsilon^8 \right].$$

8.6.3. Позначення й одиниці виміру величин наведені у *табл. 8. 2.*

*Таблиця 8.2*

Позначення й одиниці виміру величин характеристик

Позначення	Назва	Одиниця виміру
$K$	Коефіцієнт інтенсивності напружень	МПа·м <sup>1/2</sup>
$K_C$	Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень	-/-
$K_i$	Квазістатичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень	-/-
$K_C$	Умовний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень	-/-
$K_{ij}$	Поточне значення коефіцієнтів інтенсивності напружень під час поетапного рівноважного навантаження зразків	-/-
$G$	Питомі енерговитрати	-/-
$G_i$	Питомі енерговитрати на зародження квазістатичного руйнування	-/-
$G_F$	Питомі ефективні енерговитрати на квазістатичне руйнування	-/-
$G_{ce}$	Віртуальні повні питомі пружні енерговитрати на квазістатичне деформування до фрагментації	-/-
$J$	Джей-інтеграл	-/-
$J_i$	Квазістатичний джей-інтеграл	-/-
$\chi$	Критерій крихкості	-/-
$W$	Енерговитрати	МДж
$W_m$	Енерговитрати на дисансивні процеси розвитку і злиття мікротріщин до зародження квазістатичного руйнування	-/-

$W_l$	Енерговитрати на пружне деформування до зародження квазістатичного руйнування	-/-
$W_e$	Енерговитрати на локальне квазістатичне деформування	-/-
$W_{ul}$	Розрахункові енерговитрати на пружне деформування суцільного зразка	-/-
$W_{ce}$	Повні пружні енерговитрати на квазістатичне деформування фрагментів	-/-
$F$	Навантаження, яке діє на зразок у процесі випробування	МН
$F_C$	Навантаження, яке відповідає квазістатичному зрушенню магістральної тріщини у рівноважних випробуваннях	-/-
$F_C$	Навантаження, яке відповідає квазістатичному зрушенню магістральної тріщини у нерівноважних випробуваннях	-/-
$F_s$	Навантаження, яке відповідає масі зразка і додаткового обладнання	-/-
$F_{ij}$	Поточне значення навантаження, яке діє на зразок під час поетапного рівноважного навантаження	-/-
$V$	Переміщення зразка	м
$V_C$	Переміщення, яке відповідає пружній деформації зразка	-/-
$V_m$	Переміщення, яке відповідає зворотним деформаціям зразка	-/-
$V_{ul}$	Розрахункове значення переміщення суцільного зразка, яке відповідає моменту зрушення магістральної тріщини несучільного зразка	$a$
$a_0$	Довжина зароджуваної магістральної тріщини	$u$
$V_l$	Переміщення, яке відповідає локальним деформаціям зразка	-/-
$a_{cj}$	Поточне значення довжини магістральної тріщини під час поетапного рівноважного навантаження зразка	-/-
$C_0$	Початковий ексцентриситет прикладення навантаження	-/-
$b, t, L_0, L, D$	Розміри зразків	-/-
$\varphi = b/L_0$	Відносна висота зразка	м

$\lambda=a/b$	Відносна довжина зароджуваної магістральної тріщини	
$d_{am}$	Найбільший розмір агрегатного включення – заповнювача	-/-
$m_1, m_2$	Маса зразка і додаткового обладнання	Кг
$g$	Прискорення вільного падіння	М/сек <sup>2</sup>
$tga$	Тангенс кута нахилу зростальної пружної ділянки діаграми	-/-
$E_1$	Одиничний модуль пружності	МПа
$E_b$	Модуль пружності	
$f_{ctk}$	Міцність на осьовий розтяг	-/-
$f_{ctt}$	Міцність на розтяг під час згину	-/-

8.6.4. Терміни, використані у методичних рекомендаціях, і пояснення до них наведено у табл. 8. 3.

Таблиця 8.3

## Пояснення до термінів у рекомендаціях

Термін	Пояснення
1. Тріщиностійкість бетону.	Термін, що визначає здатність бетону чинити опір зародженню та розвитку тріщини під час механічних та інших впливів.
2. Тріщина	Порожина, утворена без вилучення матеріалу, поверхнями, які за відсутності напружень віддалені одна від одної на відстань, у багато разів меншу від довжини самої порожнини.
3. Магістральна тріщина	Тріщина, довжина якої перевищує розміри структурних складових матеріалів і областей самозрівноважених напружень, відповідними поверхнями на яких пройде фрагментація тіла.
4. Коефіцієнт інтенсивності напружень $K$ .	Величина, яка визначає напружено-деформований стан і зміщення біля вершини тріщини незалежно від схеми навантаження, форми і розмірів тіла тріщини.
5. Умовний коефіцієнт інтенсивності напруження $K^*$	Значення $K$ , яке визначається залежно від навантаження, яке діє на зразок, і початкової довжини тріщини $a_0$ за формулами для пружного тіла.

6. Питомі енерговитрати $G$ .	Величина, яка характеризує питомі (відносно ефективної робочої площі поперечного зразка) енерговитрати на різних етапах деформування та руйнування.
7. $J$ -інтеграл	Величина, яка характеризує роботу пластичної деформації руйнування, а також поле напружень і деформації під час пружно-пластичного деформування біля вершини тріщини (аналогічно коефіцієнту інтенсивності напружень $K$ ).
8. Умовний критичний коефіцієнт інтенсивності $K_c$	Значення $K_c$ , визначене під час нерівноважних випробувань зразків типів 1–4 за навантаженням, що дорівнює $F^*$ , і довжиною магістральної тріщини $a_0$ , яке умовно характеризує критичний стан матеріалу в умовах квазістатичного зрушення магістральної тріщини.
9. Квазістатичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_t$	Значення $K$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типів 1, 5, 6 за $G_t$ і $E_c$ , яке характеризує критичний стан матеріалу в умовах квазістатичного зрушення магістральної тріщини.
10. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_t$ .	Значення $K$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типу 1 за $G_{ce}$ і $E_c$ , яке віртуально інваріантно характеризує стан матеріалу в умовах квазістатичного зрушення магістральної тріщини.
11. Питомі енерговитрати зароджуваного квазістатичного руйнування $G_t$	Значення $G$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типу 1 за діаграмою $F-V$ , яке характеризує питомі енерговитрати на зародження квазістатичного руйнування.
12. Питомі ефективні енерговитрати на квазістатичне руйнування $G_F$	Значення $G$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типу 1 за діаграмою $F-V$ , яке характеризує питомі енерговитрати на квазістатичне руйнування.



13. Віртуальні повні питомі пружні енерговитрати на квазістатичне деформування до фрагментації $G_{ce}$	Значення $G$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типу 1 за діаграмою $I F-V$ , яке віртуально характеризує питомі енерговитрати на зародження квазістатичного руйнування.
14. Квазістатичний джей-інтеграл $J_i$	Значення $J$ , визначене під час рівноважних випробувань зразків типу 1 за діаграмами $F-V$ , яке характеризує поле напружень і деформацій біля вершини магістральної тріщини в умовах квазістатичного зрушення.
15. Критерій крихкості $\chi_F$	Характеристика крихкості матеріалу.

### **8.7. Визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань з фіксуванням розмірів зростальної магістральної тріщини і відповідних поточних значень навантаження**

8.7.1. Характеристики тріщиностійкості визначають поетапно, навантажуючи зразки протягом 60...120 с і фіксуючи значення величини  $F_{ij}$ ,  $a_{ij}$ : тип 8.5 – призма поперечного перерізу для випробування на осьовий стиск (рис.8.5); тип 8.6 – призма прямокутного поперечного перерізу для випробувань під час розтягу в умовах поцентрового стиску (рис.8.6).

8.7.2. Мінімальні розміри зразків типу 5 –  $b > 12d_{am}$ ; типу 6 –  $b > 15 d_{am}$ .

8.7.3. Для наочності визначення величини  $a_{ij}$  використовують капілярний і оптичний способи.

Капілярний ґрунтується на ефекті капілярної адсорбції півфарбованих, люмінісцентних або таких, що швидко випаровуються (ацетон), рідин у тріщині. На поверхню зразка наносять пензлем ацетон, який випаровується з поверхні швидше, ніж з тріщини, що дає змогу ідентифікувати довжину зростальної магістральної тріщини.

Оптичний спосіб ґрунтується на використанні засобів оптичної мікроскопії; слід користуватися мікроскопом з не менш як 20-кратним збільшенням.

8.7.4. Визначення характеристик тріщиностійкості.

8.7.4.1. Для кожного етапу навантаження знаходять значення

$K_{ij}$  з таких залежностей:

– для зразка типу 8.5:

$$K_{ij} = \frac{F_{ij}\pi^{\frac{1}{2}}}{tb^{\frac{1}{2}}}(1+2\lambda) \left[ 2(1+2\lambda+2\lambda^2)^2 \sqrt{\frac{2(1+2\lambda)}{1-(1+2\lambda)^4}} \right]^{-1}; \quad (8.9)$$

– для зразка типу 8.6:

$$K_{ij} = \frac{F_{ij}\pi^{\frac{1}{2}}}{tb^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{6l_0}{b} y_1 - y_2 \right); \quad (8.10)$$

де:  $y_1 = 1,99 - 2,47\lambda + 12,97\lambda^2 - 23,17\lambda^3 + 24,8\lambda^4,$

$y_2 = 1,99 - 0,41\lambda + 18,7\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4.$

Зауваження: тут

$$\lambda = \frac{a_{ij}}{b}. \quad (8.11)$$

8.7.4.2. За результатами п. 8.6.4.1. будуть залежність  $a_{ij} - K_{ij}$ ; – приймають середнє значення  $K_{ij}$  на відріжку, де тангенс кута нахилу залежності відрізняється від нуля не більш як на 8%.

8.7.5. Визначення міцності на розтяг і модуля пружності.

8.7.5.1. Величину  $f_{ctk}$  під час рівноважних випробувань зразків типів 1 і типів 5, 6 (згідно з додатком 3) визначають за формулою

$$f_{ctk} = 0,77 K_i \sqrt{2,6 \pi d_{am}}. \quad (8.12)$$

8.7.5.2. Величину  $f_{ctk}$  під час рівноважних випробувань зразків типу 1 визначають за формулою

$$f_{ctk} = \frac{3F_c L_0}{2\beta(h-a_0) \left[ (1-\lambda)^2 (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 + 25,1\lambda^3 + 25,8\lambda^4) \right]}. \quad (8.13)$$

8.6.5.3. Величину  $E_{cd}$  під час рівноважних випробувань зразків типу 1 з  $\lambda=0,1 \dots 0,5$  визначають за виразом

$$E_{cd} = \frac{E_1 L_0^3 \operatorname{tg} \alpha}{4tb^3} \left\{ \frac{3\lambda(4\lambda^2 - 5\lambda + 2)}{(1-\lambda)^2} + (1-2\lambda)^3 - 12[\lambda^3 + 2\lambda + 2\ln(1-\lambda)] \right\}. \quad (8.14)$$

## 8.8. Обладнання для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків

Для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків типу 1 використовують спеціальні машини зі стежкою системою і швидкодійним зворотним зв'язком, машини, які мають високу жорсткість, що не менше ніж у два рази перевищує початкову жорсткість зразка (рис.8.9), або стандартні машини за п. 8.3.2,

обладнані додатковим перерозподільним пристроєм (рис.8.10).

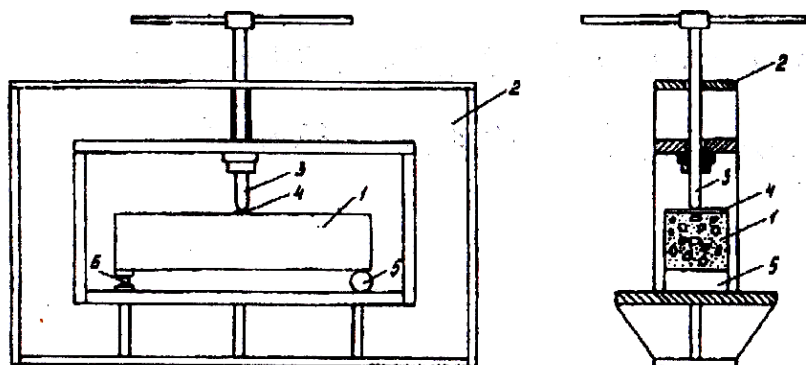


Рис. 8.9. Жорстка система випробування зразка: 1 – зразок; 2 – завантажувальний пристрій; 3 – навантажувальний гвинтовий силовимірювальний шток; 4 – розподільна балка; 5 – роликів опора; 6 – кульова опора.

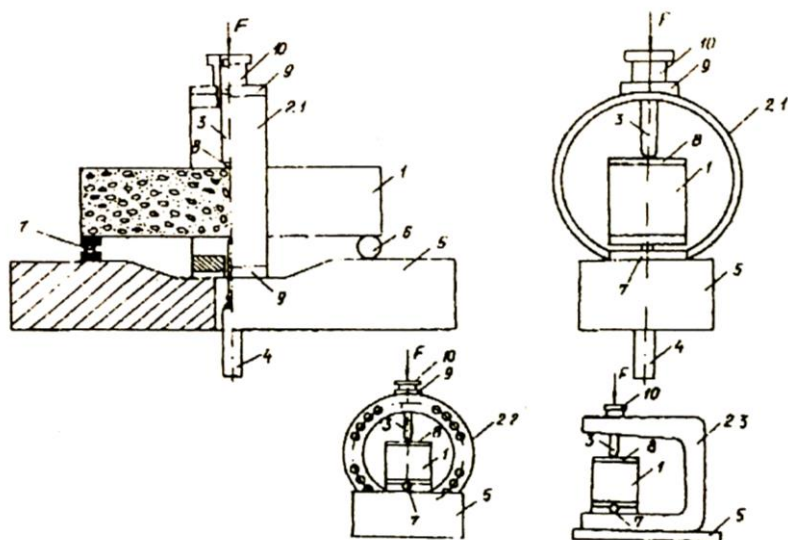
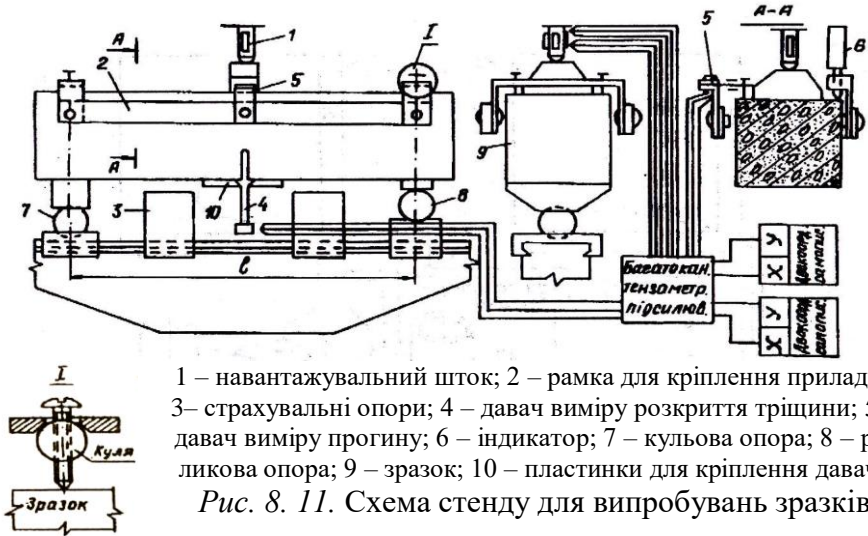


Рис. 8.10. Випробування зразка з додатковим перерозподільним пристроєм: 1 – зразок; 2 – додатковий перерозподільний пристрій типу: кільце; кільце в кільце; скоба (2.3); 3 – навантажувальний силовимірювальний шток; 4 – давач переміщення; 5 – станина; 6 – роликів опора; 7 – кульова опора; 8 – розподільна балка; 9 – фіксувальні накладки; 10 – фіксатор навантажувального силовимірювача штока

Додатковий перерозподільний пристрій, введений у систему “випробувальна машина – дослідний зразок”, перетворює її в статично невизначену відносно зусиль, які подає випробувальна машина, із особливостями перерозподілу, пропорційно до жорсткостей елемен-

тів, які входять у систему; на стадії локального (місцевого) деформування зразка додатковий перерозподільний пристрій забезпечує його рівноважний стан аж до фрагментації (з відповідним квазістатичним розвитком магістральної тріщини і фіксуванням повної діаграми  $F-V$ ) завдяки автоматичному перерозподілу зусиль між зразком зі змінною жорсткістю та пружним стальним елементом з незмінною.

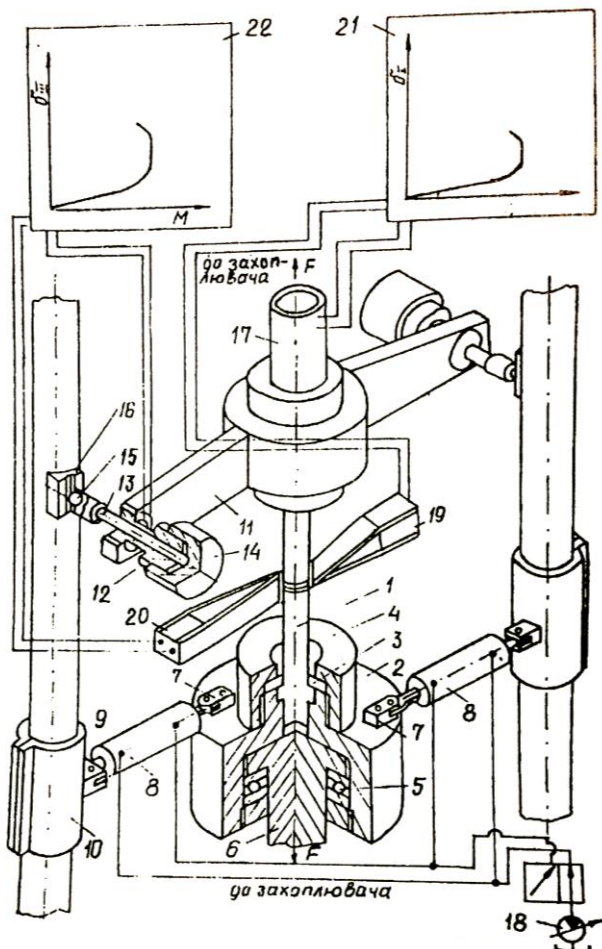


### 8.9. Рекомендації на випробування зразків під час одночасного розтягу і закруту

У цих рекомендаціях викладено методику визначення тріщиностійкості бетону під час змішаного руйнування, зокрема за механізмами нормального відриву (тип 8.1) і поздовжнього зсуву (тип III). В основу методики покладено силову схему сумісного розтягу і закруту циліндричного зразка з зовнішньою кільцевою тріщиною [77, 127, 128].

Дослідження проводять так. Виготовляють партії зразків згідно з рекомендацією розділу 2 (рис.8.7). На підготовлених зразках наклеюють дві пари підпорів для встановлення давачів нормального і поздовжнього зміщень. Після цього зразок випробовують за допомогою установки (рис.8.12) з використанням серійної розривної машини Р-50, Р-100. Установка (рис. 8.12) складається з нижньої нерухомої і верхньої рухомої частин, які кріпляться безпосередньо до траверс розривної машини. У верхній і нижній частинах установки кріплення зразка однакове. Для закручування зразок 1 встановлюють лисками в гніздо обойми 2. Осьову фіксацію зразка проводять за допомогою сухарів 3, встановлених на галтелі зразка, гайкою 4. В ниж-

ній частині обойми на упорному підшипнику 5 встановлюють планшайбу 6, яка кріпиться безпосередньо до нижньої траверси машини. На плоскій частині обойми розташовані нерухомі дві щоки 7 для кріплення гідроциліндрів 8. Нерухомий корпус гідроциліндра з допомогою штифта 9 кріпиться до хомута 10, встановленого на колоні машини.



- |                |                   |                                   |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 – зразок;    | 8 – гідроциліндр; | 15 – кулька;                      |
| 2 – обойма;    | 9 – штифт;        | 16 – пята;                        |
| 3 – сухарі;    | 10 – хомут;       | 17 – динамометр;                  |
| 4 – гайка;     | 11 – важіль;      | 18 – гідростанція;                |
| 5 – підшипник; | 12 – динамометр;  | 19, 20 – давачі переміщення;      |
| 6 – планшайба; | 13 – шток;        | 21, 22 – двохординатні самописці. |
| 7 – щока;      | 14 – гайки;       |                                   |

Рис. 8.12. Схема випробування зразків на розтяг і закрут

Верхня частина установки є важелем, який є нерухомою опорою під час кручення і рухається в осьовому напрямі при розтягу зразка. Безпосередньо до важеля 2 закріплені силовимірювачі (динамометри) 12, які вимірюють крутний момент на зразку. Важель впирається в колону через шток 13, гайку 14, кульку 15, п'яту 16. Тиск штоків 13 в п'яту 16 регулюють гайкою 14. Розтягувальну силу реєструють силовимірювачем 17 (динамометром) трубочатого типу з наклеєними тензометричними давачами.

Зразок закручують за допомогою гідроциліндрів, які працюють від автономної гідростанції 18, а розтягують від приводів розривних машин Р-50, Р-100. Завдяки двом незалежним приводам є можливість комбінувати деформації розтягу і закруту. Вимірювальна частина установки має давані переміщення 19 і 20 для фіксування нормального  $V$  і зсувного  $W$  зміщень берегів тріщини.

Сигнали від давача надходять через підсилювачі на двокоординатні самописці 21 і 22 для неперервного запису діаграми руйнування ( $V-F$ ;  $W-M$ ). Зразки випробовують так. Одну партію (не менше трьох) розтягують і записують діаграму  $V-F$ . За нею визначають  $F_*$ , уточнюють за допомогою інструментального мікроскопа діаметр перешийка тріщин і за формулою (п. 8.6) знаходять тріщиностійкість  $K_{IC}$ . Другу партію на цій же установці руйнують крученням, записуючи діаграму  $W-M$ , за якою визначають момент  $M_*$ , коли тріщина стартує. На зламі під мікроскопом уточнюють діаметр перешийка і за формулою (п. 8.6) визначають  $K_{IIIc}$ .

Дослідження під час складного напруженого стану проводять ось як. Зразок закручують до рівня 0,4  $K_{IIIc}$  – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень попередньо закрученого зразка.

Провівши дослідження при різних  $K_{IIIc}$  (наприклад 0,5; 0,6; 0,7; 0,8) будують залежність  $K_{IC}$ . Перевівши її в координати  $K_I/K_{IC} - K_{III}/K_{IIIc}$ , будуть діаграми гранично-рівноважного стану для конкретного типу бетону, аналітичний опис яких має вигляд [65]:

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^n + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right)^m = 1. \quad (8.13)$$

Із отриманих діаграм методом найменших квадратів знаходять параметри  $n$  і  $m$ .

Залежність визначає умову тріщиностійкості бетону під час складного напруженого стану, який дає змогу при заданих навантаженнях встановити допустимі дефекти або за відомих дефектів знайти допустимі навантаження.

## 8.10. Рекомендації для випробування бетону на кліматичну тріщиностійкість (морозостійкість)

У цих рекомендаціях викладено метод визначення тріщиностійкості бетону, який ґрунтується на положеннях експериментальної механіки руйнування матеріалів з урахуванням поступового руйнування бетону під дією замороження і розмороження як процесу втоми [127, 128 і ін.].

Запропонований метод не вимагає складного устаткування і тому будь-яка лабораторія, що проводить випробування бетону на морозостійкість згідно з ДСТ 4800-59 та 10060-62, маючи технічні засоби вимірювання ширини розкриття та довжини тріщини (з точністю до 0,01 мм), може ним користуватися. Методичні рекомендації розроблено відділом конструкційної міцності матеріалів у робочих середовищах ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України та іншими організаціями [166].

8.10.1. Метод використовується обов'язково з дотриманням вимог ДСТ України “Бетони. Методи випробувань та тріщинотривкість”.

8.10.2. Цим методом рекомендується користуватися під час випробувань на тріщиностійкість важких бетонів, що застосовують у транспортних, промислових, гідротехнічних та інших спорудах циклічної зміни температур.

Метод повинен застосовуватись паралельно у всіх випадках випробувань бетону на морозостійкість згідно з ДСТ 4800-59 і 10060-92 для накопичення досвіду порівняльної втрати його міцності та тріщиностійкості під час циклічного замороження-розмороження.

8.10.3. Метод ґрунтується на подібності механізмів руйнування бетону шляхом розвитку тріщин внаслідок багатократної зміни температур та циклічного навантаження.

Під час випробувань на морозостійкість накопичення залишкової деформації розширення у бетонів високої морозостійкості (Мрз 500 і більше) починається після 30...70 циклів, а у решти – практично з перших циклів випробувань.

Ріст залишкових деформацій бетону під час випробувань на морозостійкість визначається за формулою

$$\varepsilon = bN^a, \quad (8.14)$$

де:  $\varepsilon$  – сумарна залишкова деформація бетону;  $N$  – кількість циклів замороження і розмороження;  $a$  і  $b$  – параметри, що залежать від стійкості бетону в умовах випробувань.

Закономірність у логарифмічному вигляді записується так:

$$\lg \varepsilon = K + a \lg N, \quad (8.15)$$

де  $K = \lg b$ .

#### 8.10.4. Обладнання для випробувань:

а) морозильна камера, яка відповідає вимогам ДСТ 4800-59 і 10060-62;

б) прилад для вимірювання довжини зразків (рис.8.13, а).

Для вимірювання зразків індикатор годинникового типу 2 (шкала ділення 0,01 мм, границя вимірювань 10 мм) переміщується за допомогою гвинта вздовж стояка 1. Перед вимірюванням довжини еталона і зразка положення індикатора фіксується стопорними гвинтами 7; сталевий еталон з дерев'яною (пластмасовою) ізолюючою ручкою довжиною, яка на 12 мм перевищує довжину зразків бетону: термометр для вимірювання температури води розморожування; форми слід виготовити так, щоб зразок для вибраної схеми навантаження мав відхилення від регламентованої довжини 4 мм; устаткування для випробувань на тріщиностійкість (перелік у ДСТі) форми у яких торцеві стінки слід замінити спеціальними стінками з отвором у центрі для встановлення циліндричних вставок із нержавіючої сталі згідно з ДСТ 4800-59 і 10060-63 (рис. 136) валики для розморожування зразків; роз'ємні металеві форми для виготовлення зразків бетону.

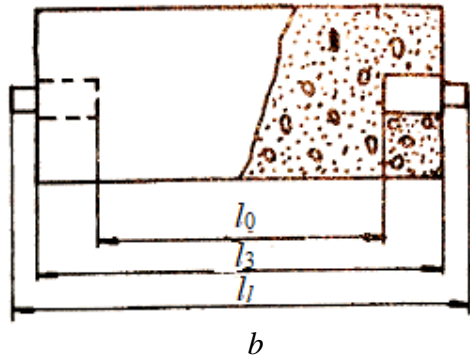
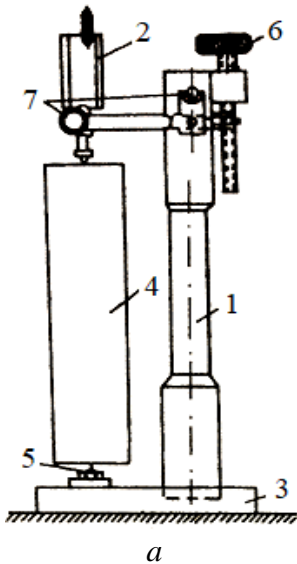


Рис. 8. 13. Прилад для вимірювання деформації (а) та зразок бетону зі сталевими вставками (б): 1 – стійка; 2 – індикатор; 3 – опорна плита; 4 – бетонний зразок; 5 – опорна куля; 6 – гвинт переміщення індикатора; 7 – опорний гвинт.

8.10.5. Розміри та кількість зразків для кожного випробування регламентується методичними рекомендаціями, що забезпечує вищу точність вимірювань порівняно з ДСТ 4800-59 і 10060-62.

Перед укладанням бетону, внутрішню поверхню форми покривають тонким шаром мінеральної оливи. Після змазування у торцеві



стілки форм вкладають вставки, фіксуючи їх в отворах стінок гвинтами.

Слід зафіксувати вставки вздовж осі бетонного зразка так, щоб олива не попадала на їх поверхню. Бетонну суміш готують звичайними способами. Формування та тверднення зразків бетону повинно проходити відповідно з прийнятою технологією таких робіт. Розпалубку зразків здійснюють не раніше, ніж через 2 доби після їх формування, щоб запобігти ушкодженню ділянок вмуровування вставок. Вік зразків до початку випробувань за відсутності спеціальних вказівок приймається рівним 28 діб для тих, що тверднули у вологих умовах і 7 діб, які пропарювались перед твердненням у вологих умовах.

8.10.6. Попереднє насичення зразків бетону водою, а також їх заморожування і розморожування слід проводити згідно з ДСТ 10060-62.

8.10.7. Зразки з бетону, призначеного для споруд, які експлуатуються в умовах сумісної дії морозу і морської (або іншої мінералізованої) води, повинні бути насичені такою ж водою.

Цей розчин достатньо приготувати на основі даних хімічного аналізу, причому в нього вводять тільки хлориди і сульфати (якщо є значна кількість карбонатів, тоді їх теж слід ввести). Таким самим повинно бути середовище для розморожування.

8.10.8. Штучні тріщини у бетонних зразках наносять перед випробуванням на морозостійкість згідно з методичними рекомендаціями.

8.10.9. Режим випробувань в умовах циклічних змін температур повинен бути стабільним впродовж всього випробування. Перед першим циклом заморожування, а потім через кожних 2–3 в кінці переходу розморожування вимірюють довжину зразків і температуру води, яка є середовищем для розморожування. Всі результати записують у журнал.

8.10.10. Відносну деформацію розширення зразків бетону обчислюють за формулою:

$$\varepsilon = \frac{(A_1 - A_0)}{l_0}, \quad (8.16)$$

де:  $l_0$  – база вимірювання, тобто віддаль між торцями вставок, мм (рис.8.13);  $A_0$  і  $A_1$  – довжина зразків до і після першого циклу заморожування - розморожування.

8.10.11. Значення відносної деформації розширення, отримані під час випробувань на морозостійкість, наносять на графік (точка  $A$ , рис.8.14) навпроти відповідних значень кількості заморожувань і розморожувань.

Графік використовують для визначення кількості циклів, після яких приріст деформацій стабілізується і результати вимірювань розміщуються близько до прямої лінії.

Параметри рівняння – ( $\alpha$  – кут нахилу прямої до горизонтальної осі і  $K$  – відрізок, що відтинається прямою вертикальної осі, які необхідні для прогнозування морозотривкості, графічно неможливо встановити точне розміщення прямої відносно експериментальних точок.

8.10.12. Для уточнення параметрів рівняння слід провести математичну обробку (апроксимацію) даних випробувань, яку найкраще здійснити на персональних комп'ютерах (ІВМ), використовуючи будь-які програми ефективної апроксимації. В інших випадках рекомендується обчислювати методом найменших квадратів, використовуючи не менше 10 значень деформації, отриманих протягом 20...80 циклів. Для підвищення точності використовують не менше 20 значень.

8.10.13. Графічний метод визначення морозостійкості. На графіку (рис. 8.14) за параметрами рівняння, обчисленими для кожного зразка окремо, проводять пряму до перетину з кривими граничних деформацій. Для цього задають двома значенням  $N$ , наприклад 10 і 100, і, підставляючи їх в рівняння, обчислюють спочатку значення  $\lg \varepsilon_{10}$  і  $\lg \varepsilon_{100}$ , а потім –  $\varepsilon_{10}$  і  $\varepsilon_{100}$ .

Отримані дані наносять на графік  $A$  і проводять через них пряму лінію. Морозостійкість зразка визначається, як кількість циклів, за яких пряма перетинається з однією з граничних кривих. Перетин з кривою визначає  $M_{pz}$  для всіх сумішей без додатку сульфітно-спиртової барди (с. с. б.), перетин з кривою 2 – для суміші без неї.

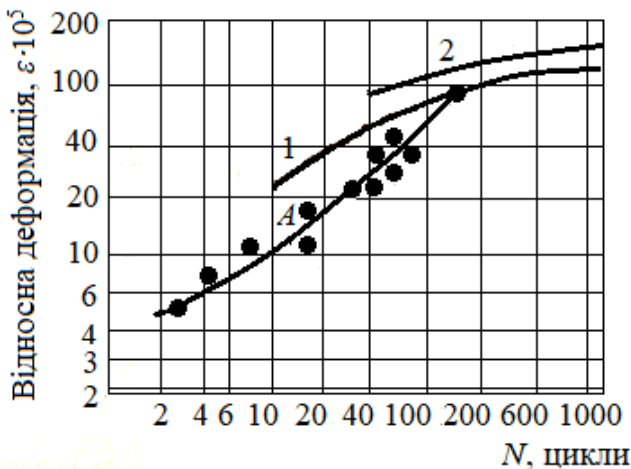


Рис. 8.14. Номограма залежності відносних деформацій  $\varepsilon$  від числа циклів [127, 128].

8.10.14. Рекомендується паралельно з випробуванням за цим методом проводити контрольні випробування з оцінкою стану зразків бетону в результаті зміни динамічного модуля пружності (наприклад, резонансним методом).

8.10.15. Кліматична тріщиностійкість – характеристика в'язкості руйнування зразків, попередньо випробуваних на морозостійкість, визначається, згідно з положенням методичних рекомендацій, випробуванням на руйнування.

Дані випробувань записують у журнал.

Отримана характеристика, наприклад критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень, записується так (рис. 8.13):

$$K_{IC}^{(MP3)} = 1,9 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}. \quad (8.17)$$

8.10.16. Як свідчить розвиток тріщини у спорудах, які утворились внаслідок змін температури, штучні тріщини у зразках слід наносити після відповідної кількості циклів заморожування-розморожування, а випробування на кліматичну тріщиностійкість далі проводити згідно з положеннями цих рекомендацій.

## **8.11. Визначення розрахункових параметрів руйнування бетонів, дисперсно армованих базальтовим волокном**

Наукові організації Західного наукового центру НАН України та підприємства з виробництва залізобетонних конструкцій інтенсивно працюють над покращенням міцності, деформативності, тріщиностійкості конструкції з різних видів бетону [161, 163, 166, 245].

У композиті з цементною основою, армованому базальтовим волокном, позитивний вплив волокон можна спостерігати під час розтріскування матриці. Під навантаженнями, які перевищують граничні, матриця починає розтріскуватися. Подальший ріст і розкриття тріщин стримують контакти, утворені волокнами, які з'єднують протилежні береги тріщин. Для моделювання цього явища в механіці руйнування застосовують характеристики тріщиностійкості.

**Фізико-механічні характеристики бетонів, дисперсно армованих базальтовим волокном.** Різні дефекти порушують суцільність та неоднорідність структури бетону, утруднюють визначення поля напружень. З введенням базальтових волокон, споріднених за хімічним складом з цементовим каменем, дефектність структури знижується і підвищуються фізико-механічні характеристики бетону.

Протягом останнього десятиріччя у ФМІ НАН України та ВО “Закарпатзалізобетон” проведено комплексні дослідження характеристик міцності та тріщиностійкості бетонів, дисперсно-армованих

базальтовим волокном, та технології виготовлення дослідних партій натурних конструкцій з таких бетонів – плити перекриття, балконні плити, сантехкабіни та вентиляційні блоки [127, 128].

На підставі цих досліджень [127, 128] оптимізовані склади базальтобетону та базальтозолешлакобетону залежно від класу та міцності (табл. 8.4 і 8.5).

Встановлено значні переваги бетонів, дисперсно армованих базальтовим волокном над традиційними. Так, для базальтобетону, базальтозолешлакобетону:

міцність на стиск становить  $f_{cd}^{\delta} = (1,2 - 1,3)f_{cd}$ ;

міцність на розтяг  $f_{cd}^{\delta} = (2 - 3)f_{ctk}$ ;

ударна міцність базальтобетону в 6–8 разів вища;

зчеплення базальтобетону з арматурою на 20...30% більше;

– довговічність таких бетонів знаходиться в межах 50...70 років залежно від агресивності середовища;

– корозійна стійкість базальтобетону вища на 15...20%.

Технологія виготовлення виробів із базальтобетону, базальтозолешлакобетону аналогічна виготовленню конструкцій із звичайного бетону. Однак, оскільки існує обладнання бетонозмішувальних вузлів не враховує можливості подачі волокнистих матеріалів, то для базальтобетону необхідний додатковий дозатор волокна.

**Визначення характеристик тріщиностійкості бетону.** Як відомо, основні схеми випробування матеріалів на тріщиностійкість регламентуються ДСТ 25.506-85. Однак методики випробування на тріщиностійкість бетонів поки що недостатньо розроблені [105, 117, 121]. Деякі дослідження [101] свідчать про стандартизовану ефективність застосування для бетону схеми №4 – поперечний згин плоского зразка. За нею визначають силовий критерій Ірвіна  $K_I$  та деформаційний критичного розкриття у вершині тріщини за  $\delta_k$  – моделлю Леонова-Панасюка під час реалізації руйнування нормальним відривом в елементі, який розраховується на тріщиностійкість. Необхідні розрахункові формули наведено у праці [102, 103, 121]. На рис. 8.15 схематично показано розкриття тріщини при згині балкового зразка.

Оскільки, практично неможливо точно виміряти розкриття у вершині тріщини, то в експерименті досліджують розкриття тріщини на поверхні зразка  $\delta_n$ . Вважають, що перед вершиною тріщини довжиною  $l$  утворюється пластичний шарнір, який забезпечує симетричний поворот половин зразка, які розділені поверхнями руйнування (як жорсткого цілого довкола деякої точки – центра пово-

роту). Її положення на осі зразка визначається в долях до нетто-розміру за допомогою параметра  $r$  – коефіцієнта повороту. За схемою на *рис. 8.15*. отримуємо залежність між розкриттям  $\delta_b$  тріщини у вершині і вимірюваною величиною  $V$ :

$$\delta_b = \frac{r(b-l)}{l+r(b-l)} V_n, \quad (8.18)$$

Таблиця 8.4

Витрата матеріалів для базальтобетону

Клас базальтобетону за міцністю на стиск	Розхід на м <sup>3</sup> бетону					
	цемент, кг	пісок, кг	грубе базальтове волокно, 150...400 мкм, кг	вода, кг	СДБ, %	ок, см
C7,5	220	1670	150	225	0,2	1-4
C15	330	1600	200	220	0,2	1-4
C25	430	1480	250	215	0,2	1-4
C20	470	1420	250	212	0,2	1-4
C30	500	1360	300	210	0,2	1-4
C40	600	1200	400	200	0,2	1-4

Таблиця 8.5

Витрата матеріалів для базальтозолотшлакобетону

Клас базальтозолотшлакобетону за міцністю на стиск	Розхід на м <sup>3</sup> бетону							
	цемент, кг	пісок, кг	щебінь, кг	золотшлак, кг	грубе базальтове волокно, 0150...400 мкм, кг	вода, кг	СДБ, %	Ос. кон, см
C7,5	190	500	1030	300	100	170	0,2	1-4
C10	220	420	1090	300	100	172	0,2	1-4
C15	250	350	1050	300	150	175	0,2	1-4
C20	295	370	1020	300	200	180	0,2	1-4
C25	320	320	1000	300	200	185	0,2	1-4

де  $b$  – висота зразка.

Значення коефіцієнта повороту  $r$  знаходили на основі розв'язків відповідних пружно-пластичних задач. Встановлено, що під час чистого згину коефіцієнт повороту не залежить від розмірів зразка і тріщини. Його величина постійна і може бути прийнята рівною 0,37.

Під час поперечного (триточкового) згину  $r$  є функцією двох геометричних характеристик зразка  $l/b$  і  $(b-l)/L$ , де  $L$  – віддаль між опорами. Чисельні дані коефіцієнта  $r$  подано у *табл. 8.6*.

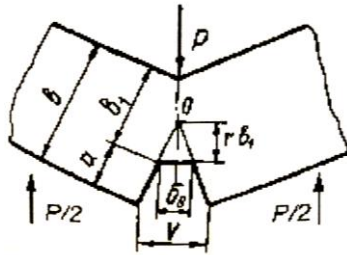
Для розрахунку максимального зусилля випробувальної машини треба користуватись формулою

$$P_{\max} \geq 0,1(b-l)^2(\sigma_{0,2} + R_{bt})/t/b. \quad (8.19)$$

При цьому

$$K_I(P_{\max}) = K_{IC}. \quad (8.20)$$

Коефіцієнт інтенсивності напружень



*Рис. 8.15.* Схема розкриття тріщини під час триточкового згину балкового зразка

$$K_I = 3,494PL/t\sqrt{b^3} \left[ 1 - 3,396(l/b) + 5,839(l/b)^2 \right], \quad (8.21)$$

де  $t$  – товщина зразка.

Випробовують бетонні призматичні зразки з тріщинами-надрізами до руйнування (*рис. 8.16*). Навантаження  $P$  створюють універсальною випробувальною машиною з тензOMETричним динамометром підвищеної жорсткості.

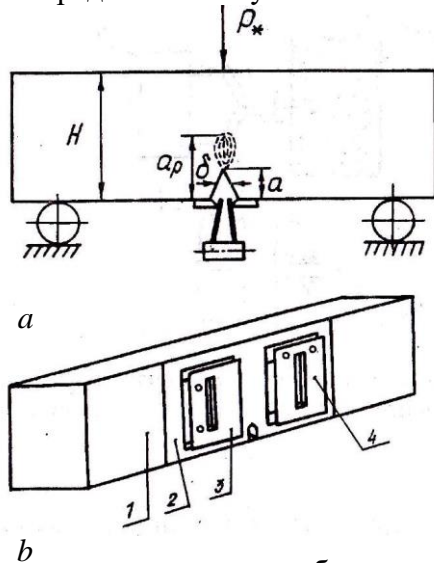
Швидкість навантаження встановлюють за швидкістю переміщення активного захоплювача випробувальної машини в межах 0,02...0,1 мм/с з таким розрахунком, щоб середня швидкість збільшення коефіцієнта інтенсивності напружень була в межах 0,1...0,3 МПа м/с на лінійній ділянці діаграми. Розкриття тріщини на поверхні зразка  $V$  вимірювали за допомогою двоконтактних давачів. Критичні значення  $K_{IC}$  і  $\delta_e$  рекомендують визначати в момент зрушення тріщини за формулами (8.18)–(8.21).

Розкриття тріщини на поверхні зразка вимірюють двоконтактними давачами (*рис. 8.17*). Діаграми  $P$ – $V$  записують на двокоординатних потенціометрах, режим роботи яких повинен забезпечувати не менш ніж 25-кратне збільшення по осі  $V$ .

Тріщина має вигляд наскрізного надрізу, кут біля вершини якого рівний  $60^\circ$ , з радіусом заокруглення 0,1 мм. Ефективне

ініціювання тріщини за допомогою змащеної фольги під час закладання бетонної суміші у форми на стадії виготовлення зразків.

Критичні значення  $K_{IC}$  визначаються в момент, зрушення тріщини (руйнування) за формулами (8.19) – (8.21). Для встановлення довжини тріщини радимо застосувати катетометр.



*Рис. 8.16.* Схеми триточкового згину балкового зразка з боковою тріщиною та кріплення давача зміщення (*a*), а також виду залізобетонного зразка з пристроєм вимірювання довжини тріщини (*b*): 1 – бетонна поверхня зразка; 2 – шар металевої фольги; 3 – передавальна котушка; 4 – приймальна котушка.

**Експериментальна методика прецизійного знаходження довжини тріщини та деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів.** Отримані [106, 113, 117] аналітичні співвідношення через довжину тріщини під час згину для залізобетонних балкових елементів. Щоб використати ці результати в практичних розрахунках тріщиностійкості будівельних конструкцій, необхідно випробувати зразки із відповідного типу бетону, який використовують в цих елементах, для визначення деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів – критичного розкриття у вершині тріщини  $\delta_k$ , від якого залежить умова поширення – тріщини за моделлю Леоніва-Панасюка.

Випробовували на триточковий згин призматичні бетонні зразки розмірами 100x100x400 мм з крайовою тріщиною (*рис.8.18*), дотримуючись основних вимог, сформульованих в праці [41, 123, 126, 131]. Тріщиною є наскрізний надріз довжиною 30...40 мм (ство-

рений фрезерними інструментами), кут у вершині якого  $60^\circ$ , з радіусом заокруглення 0,1 мм. Для кожного виду бетону марок С10-С40 (важкого) випробовували серію із чотирьох зразків-близнюків. З метою вивчення впливу на тріщиностійкість грубого базальтового волокна в бетонній суміші, досліджували зразки з двох видів базальтобетону класу міцності С15 та С25, виготовлених за методикою. Підготовлені зразки руйнували зосередженим згином на випробувальній машині, обладнаній тензометричним давачем зміни навантаження (зі швидкістю переміщення індентора  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с).

Таблиця 8.6

Чисельні дані коефіцієнта  $r$

$l/b$	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
$2b/L$	0,35	0,30	0,5	0,20	0,15	0,10
$r$	0,451	0,447	0,443	0,440	0,436	0,432

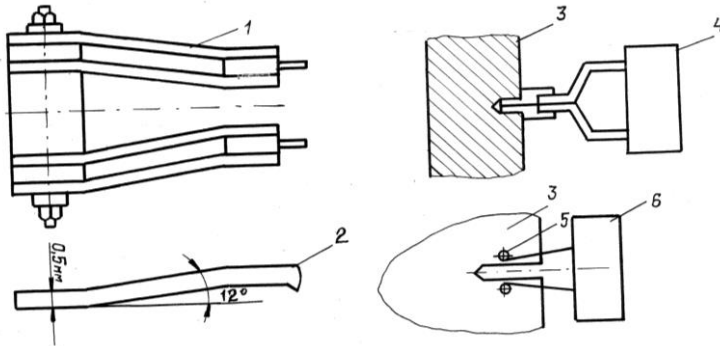


Рис. 8.17. Схема встановлення двоконсольного тензодавача вимірювання розкриття тріщин:

1, 2 – консолі; 3 – зразок; 4, 6 – давачі; 5 штифти.

Отримання реальних характеристик тріщиностійкості ускладнюється визначенням місця знаходження вершини тріщини у бетоні. Стандарт для встановлення критеріїв тріщиностійкості бетонів пропонує наносити на бетонну поверхню ацетон, який випаровує з поверхні швидше, ніж з тріщин; таким чином, можна зафіксувати її фактичну довжину, але він незручний; інший, запропонований в праці [6], полягає у створенні на поверхні зразка електромагнітного поля вихрових струмів і реєстрації його параметрів під час розвитку тріщини. Щоб утворити електромагнітне поле, на бокову поверхню (попередньо відшліфовану) зразка наклеюють тонку алюмінієву фольгу, яка виконує роль струмопровідного шару. У тонкому металевому шарі ініціюється електромагнітне поле вихрових струмів, яке



змінюється під час росту тріщини в шарі, викликаному ростом тріщини в бетонному зразку. Реєструючи зміну параметрів поля, можна визначити довжину тріщини в бетоні під час її росту.

Розглянемо приклад реалізації цього методу (рис. 8.18).

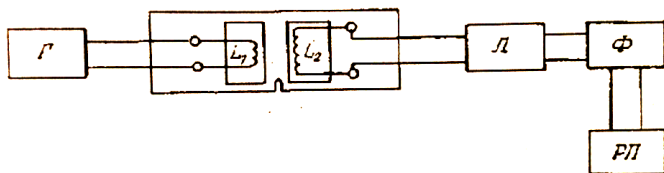


Рис. 8.18. Схема підключення приладів до пристрою вимірювання довжини тріщин

На тонкий металевий шар (фольгу) на віддалі 5 мм від площини надрізу встановлюють пару котушок індуктивності  $L_1$  і  $L_2$ . Використовують комплекс приладів, схему підключення яких подано на рис. 8.18: генератор Г3118, підсилювач сигналу з коефіцієнтом підсилення 11,5, фільтр та реєструвальний пристрій (вольтметр типу Щ 4300).

Принцип вимірювання такий: від генератора  $G$  сигнал визначеної частоти (8 кГц) і амплітуди (12 В) подається на котушку  $L_1$  (2 тис. витків мідного дроту 0,07 мм), яка збуджує у металевому шарі вихрові струми, що створюють електромагнітне поле. Котушкою індуктивності  $L_2$  (10 тис. витків дроту) сигнал приймається і через підсилювач  $L$  і смуговий фільтр  $F$  подається на реєструвальний пристрій  $RP$ . Під час росту тріщини внаслідок розривів струмопровідного шару електромагнітне поле між котушками  $L_1$  і  $L_2$  змінюється, що відбивається на амплітуді сигналу, який приймається індуктивністю  $L_2$ , а отже, на показах реєструвального пристрою.

Перевагою запропонованого методу вимірювання довжини тріщини є висока точність, можливість дистанційного, а також автоматичного спостереження за ростом тріщини під час підключення самописця (як реєструвального пристрою), а також ПК. Для вимірювання поверхневого розкриття тріщини  $V$  на її торцевих берегах розміщували давач зміщення.

Діаграму навантаження-переміщення записували на двохкоординатному самописці ЛКД-4-003. З аналізу отриманих діаграм для різних марок бетону (рис. 8.19) видно, що зміщення берегів у вершині тріщини має пружну  $\delta_n$  та пластичну  $\delta_{nl}$  складові, подібно до діаграм для металів:

$$\delta_b = \delta_n + \delta_{nl} \quad (8.22)$$

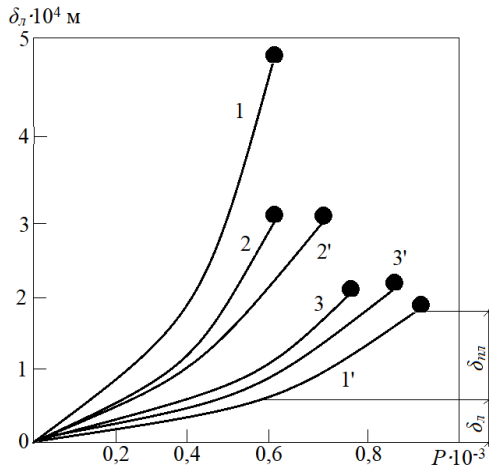


Рис. 8.19. Діаграми розкриття- навантаження у вершині тріщини для різних марок бетону: 1 – С10; 2 – С15; 3 – С20; 4 – С25.

Як засвідчили результати експериментів, значення  $\delta_b$  збільшується із підвищенням марки бетону. Для бетону, на відміну від металів, характерна значна різниця між величинами пружної та пластичної складових  $\delta_n \ll \delta_{nl}$ , причому для низькоміцних марок (В 10) пружна складова майже відсутня, що зумовлено, мабуть, значною неоднорідністю матеріалу та внутрішніми напруженнями. Для пружно-пластичних матеріалів критичне розкриття у вершині тріщини наближено можна ввести рівним пластичній складовій:

$$\delta_b \approx \delta_{nl} \quad (8.23)$$

Для бетону такий варіант неприйнятний, оскільки, по-перше, складова  $\delta_{nl}$  [127, 128] залежить від розмірів зразків, і, по-друге, в розв'язок узагальненої задачі Гріффітса із врахуванням пластичних деформацій у вершині тріщини, на підставі якого виведена рівність (8.11.6), входять як параметри  $\sigma_t$  та довжина зони пластичних деформацій  $d$  біля вершини тріщини, тобто величини, точне визначення яких для бетону поки що проблематичне.

Для визначення розкриття тріщини  $\delta(x)$  використано формулу, виведено на основі підбору емпіричної кривої числових результатів, отриманих методом скінченних елементів:

$$\delta_k = f \left[ \left( 1 - \frac{a}{a_p} \right)^2 + \left( 1,081 - 1,149 \frac{a_p}{H} \right) \left( \frac{a}{a_p} - \left( \frac{a}{a_p} \right)^2 \right) \right]^{1/2} \quad (8.24)$$

Довжина зони передруйнування (псевдопластичних деформацій)  $d = a_p - a$  біля вершини тріщини вважається постійною величиною

ною для відповідної марки бетону і визначається методом каплярної адсорбції [128].

Середні значення величин  $\delta_k$  (обчислені за формулою (8.24)) для кожної серії зразків (при довжині тріщини 30, 35, 40 мм), а також границя міцності  $f_{ctk}$ , встановлені в результаті випробувань, подано в табл. 8.7, з якої видно, що КРТ значно залежить від марки бетону, а з підвищенням міцності бетону  $\delta_k$  зменшується.

Таблиця 8.7

Середні значення величин  $\delta_k$  (обчислені за формулою (8.24))

Марка бетону, границя міцності: при одно-сьовому розтязі	C10	C15	C15*	C20	C20*	C25	C30	C35	C40
проектна $f_{ctk}$ , МПа	0,85	1,15	1,15	1,4	1,4	1,6	1,8	1,95	2,1
реальна $f_{ct}$ МПа	0,83	1,14	1,15	1,4	1,39	1,61	1,75	1,93	2,17
$\delta_k$ (КРТ), $M \cdot 10^{-4}$	4,85	2,63	3,01	1,91	2,31	1,57	1,25	1,18	0,89
Довжина зони передруйнування $d$ , см	3,4	3,2	2,1	2,7	1,8	2,3	1,9	1,7	1,1

\* Базальтобетон

На підставі цих випробувань можна зробити висновки:

– критичні значення  $K_{IC}$  і  $\delta_C$  визначаються в момент зрушення тріщини (руйнування) за формулами (8.19)–(8.21). Для встановлення довжини тріщини рекомендуємо застосовувати катетометр. Ефективним є ініціювання тріщини за допомогою змащеної фольги під час закладання бетонної суміші у форми на стадії виготовлення зразків;

– розроблено методику для експериментального визначення деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів та методика випробування бетонних зразків з надрізами;

– методику прецизійного визначення довжини та розкриття тріщин раціонально використовувати тільки для конструкцій, до яких ставляться підвищені вимоги, в інших випадках достатні візуальнооптичні обстеження;

– на підставі експериментальних досліджень можна ствердити наступне: введення грубого базальтового волокна у бетонну суміш (за відповідною методикою [128]) відчутно підвищує характеристики тріщиностійкості бетону, деформаційний параметр  $\delta_k$  для бетону C15 зростає на 15% (для C20 – на 20%), а довжина зони передруй-

нування біля вершини тріщини суттєво зменшується;

- використання у будівельних конструкціях базальтобетону дасть змогу знизити витрачання сталеної арматури до 20% при частковій і в деяких конструкціях до 100% при повній заміні, а базальтозолотшлякові – з економити цемент (до 10 кг/м<sup>3</sup>) та метал.

## 8.12. Висновки до розділу 8

Тривалі дослідження характеристик тріщиностійкості бетонів, які описано у цьому розділі та наведені розроблено методичні рекомендації в яких описано результати досліджень, зокрема, встановлені зразки для рівноважних і нерівноважних випробувань їх проведення та визначення зростання магістральної тріщини під час зростання навантаження та дослідження на кліматичну тріщиностійкість, випробування бетонів армованих базальтовим волокном дали змогу сформулювати такі висновки:

1. У цьому розділі адаптовано основні критерії і засади експериментальної механіки руйнування стосовно визначення характеристик тріщиностійкості бетонів. Сформульовано мету і завдання та науковий рівень методичних рекомендацій. Зокрема, встановлено необхідність розробки рекомендацій і опрацьовано характеристики методів стандартизації та на основі аналізу науково-технічних джерел встановлено світовий науково-технічний рівень цих рекомендацій.

2. На основі аналізу свідоцтв і патентів ЄСРП, фонду патентної бібліотеки США, Франції, Великобританії, Німеччини та інших країн розглянуто відповідні аналоги, вибрано найсуттєвіші показники, і їх порівняння в результаті цього вдалось сформулювати загальні положення та зразки, які наведено і описано в цьому розділі.

3. На підставі виконаних досліджень було розроблено відповідне обладнання і створено методику для проведення випробувань і методику обробки одержаних результатів. Зокрема, розраховують силові й енергетичні характеристики тріщиностійкості за наведеними залежностями, а характеристики тріщиностійкості визначають за результатами нерівноважних випробувань зразків типів 1–4 одержують залежності для  $K_{IC}$  і  $K_{IIIc}$  та  $K_C^*$ . Позначення і одиниці виміру величин наведено у *табл. 8.2*.

4. Створено методику визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань з фіксуванням розмірів зростаючої магістральної тріщини та відповідних поточних значень навантаження, цю методику описано і наведено поетапно наванта-

жуючи зразки типів 8.5. в 8.6 протягом 60...120 с. і фіксуючи значення  $F_{ij}$ ,  $a_{ij}$ : Побудовано залежності для  $K_{ij}$ ,  $f_{ctk}$ , та для  $E_b$ . Створено також обладнання для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків та наведено схеми випробувань.

5. Створено та апробовано рекомендації на випробування зразків при складному напруженому стані під час одночасного розтягу і стиску. Викладено методику визначення тріщиностійкості бетону під час змішаного руйнування, за механізмом нормального відриву і поздовжнього зсуву. Методику описано ґрунтовно з наведенням схеми випробувань зразків на розтяг і закрут і приведено відповідну залежність для оцінки тріщиностійкості при складному напруженому стані.

6. Розроблено рекомендації для випробування бетону на кліматичну тріщиностійкість (морозстійкість). Викладено метод визначення тріщиностійкості бетону, який ґрунтується на положеннях експериментальної механіки руйнування. Наведено відповідну залежність та схему приладу для вимірювання деформацій і зразок із сталевими вставками та номограма залежності відносних деформацій  $\epsilon$  від числа циклів.

7. Представлено результати досліджень визначення розрахункових параметрів руйнування бетонів, що дисперсно армовані базальтовим волокном. Наведено залежність на стиск та розтяг та одержано залежність між розкриттям  $\delta_c$  тріщини у вершині вимірювальною величиною  $V_1$ . Приведено дані розходу матеріалів для бетонів класів С7,5, С15...С40 для базальтобетону та базальтозолошлакобетону. Представлено схему розкриття тріщини під час триточкового згину і наведено залежність для  $K_f$ . Описано також експериментальну методику прецезійного знаходження довжини тріщини і деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів. Одержано залежність для розкриття тріщини  $\delta_k$  виведено апроксимуючи результати методом скінченних елементів.

## 9. ДОВГОТРИВАЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ОСНОВ І ФУНДАМЕНТІВ

### 9.1. Натурні обстеження і довготривалі випробування будівель і споруд

Для визначення фактичного стану будівельних конструкцій, забезпечення надійної та безаварійної експлуатації будівель і споруд перед їх реконструкцією у зв'язку з фізичним та сучасним старінням проводять натурні обстеження. Довготривалі випробування виконують з метою вивчення дійсної роботи й удосконалення методів розрахунку і конструювання [217]. Такими випробуваннями виявляють впливи на будівлю силових, деформаційних, температурних, агресивних факторів, а також оцінюють стан будівлі (*рис. 9.1*), дійсні напруження, деформації і їх зміни в часі для ґрунтів основи 1, фундаментів 2, колон у найбільш відповідальних перерізах, які сприймають максимальні напруження 3, стін у місцях найбільш інтенсивних навантажень і впливів 4, згинальних елементів у місцях максимальних моментів 9 і перерізальних сил 6, вузлів 21.

Будівлі, що експлуатуються, мають типові місця можливої дії найбільших додаткових навантажень й інших впливів, найбільш ймовірні ділянки деформативності і меншої довговічності елементів конструкцій. Так, додаткові впливи і понижена довговічність спостерігаються [137, 138, 217]:

- для основ – у зонах складування важких вантажів 14 (прокату, зливків та ін.), особливо поблизу колон, де напружені зони в основі під фундаментом і вантажем накладаються одна на другу, викликаючи крени фундаментів; у місцях прокладання підземних комунікацій 22, із яких в основи протікає рідина, при цьому можливі зміни складу ґрунту, які зумовлюють додаткове зсідання; при попаданні в основу агресивної рідини 18 при їх аварійному викиді з технологічної апаратури, що веде до спучування ґрунту разом з фундаментом; при вібраційних впливах від обладнання 12 або транспорту, коли вібрація основи викликає додаткові деформації фундаментів;

- для фундаментів – у зонах дії агресивної рідини 18, вібрацій 12, додаткових вантажів від складування яких-небудь предметів 14, розташування глибоких приямків, в тому числі з 15, у зоні тимчасового (сезонного) промерзання основи, під час спорудження прибудов, розробки близько розташованих котлованів, забивки додаткових паль;

- для колон – у найбільш напружених запах стику з фундаментом 3, у консолі, у стику колон по висоті; поблизу підлоги на перек-

риттях (там, де можливі впливи транспорту або попадання агресивних рідин);

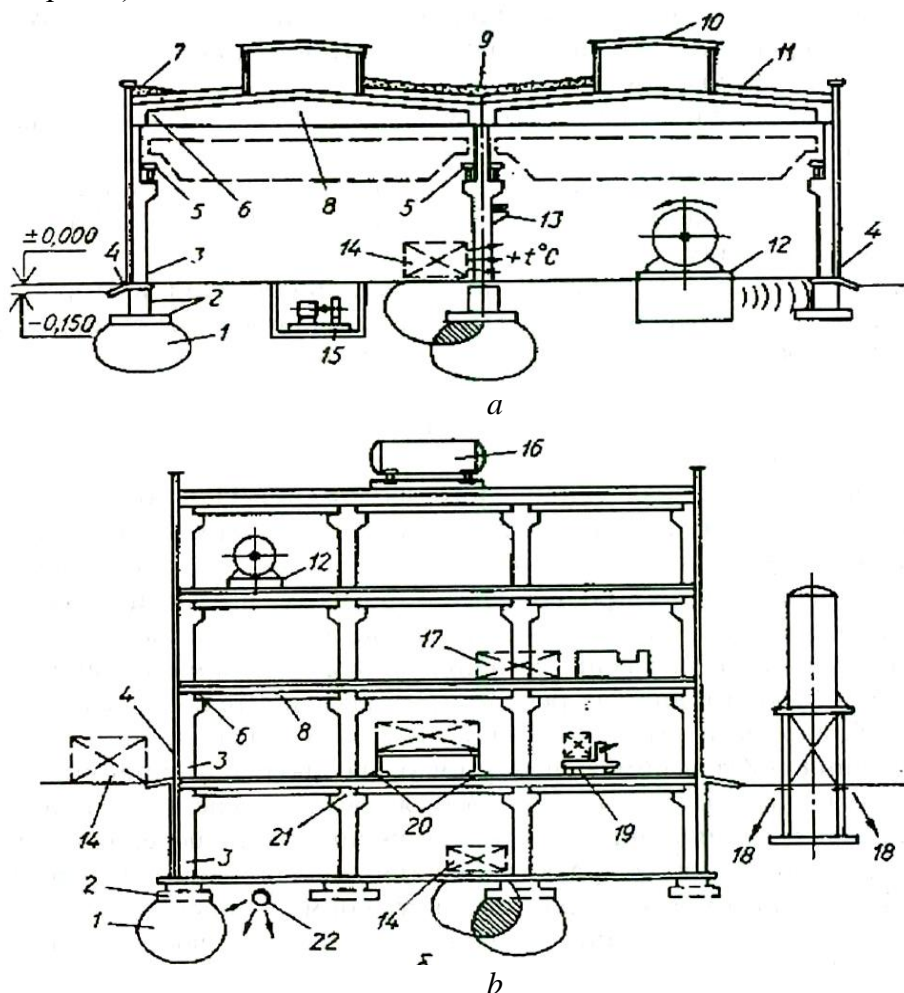


Рис. 9.1. Типові місця вимірювання і спостереження під час обстежень і довготривалих випробувань: *a* – одноповерхова промислова будівля; *b* – багатоповерхова: 1 – напружена зона основи під фундаментом; 2 – фундамент; 3 – низ колони; 4 – низ стіни; 5 – підкранова балка; 6 – приопорна зона ригеля; 7 – пороховий мішок у парапету; 8 – середня зона ригеля; 9 – пороховий мішок біля ліхтаря; 10 – ліхтар; 11 – покриття; 12 – фундамент агрегату; 13 – кронштейн для трубопроводів; 14 – вантаж для привантаження основи, в тому числі з впливом високої температури на конструкцію; 15 – прямок; 16 – резервуар з барботуванням; 17 – навантаження у зоні обслуговування обладнання; 18 – місця можливих аварійних викидів агресивних рідин; 19 – місце проїзду електрокарів; 20 – зосереджені вантажі від обладнання; 21 – вузли з'єднань збірних елементів; 22 – місце проходу підземних комунікацій.

– для двогілкових колон – у підкрановій гілці; у стикових вузлах з ригелем перекрить; у місцях можливих теплових впливів, наприклад, злитків, які застигають 14;

– для ригелів і плит перекрить – у зонах дії максимальних згинальних моментів 8 і перерізальних сил 6, стиків, передачі зосереджених зусиль 20, проїзду легкого транспорту 19, дії вібраційних навантажень 12, у зонах обслуговування станків 17, а також на ділянках дії агресивної рідини, газів і пилу;

– для покриттів 7, у зонах підвищеного зволоження зі сторони приміщення, у місцях дефектів 11 і мішків з накопиченням технологічного пилу 9, 7, обумовлених наявністю ліхтарів 10 і парпетів, на ділянках зі збільшеною товщиною або щільністю утеплювача 11 у місцях розташування динамічного обладнання, наприклад, ємність з рідиною 16, у яких протікає барботування;

– для стін – у зонах підвищеного зволоження із заморожуванням і відтаванням 4, у стиках, кріпленнях до колон, які примикають до підлоги.

Перед проведенням натурних обстежень і довготривалих випробувань будівель і споруд розробляють програму, в якій вказано мету і задачі досліджень, методи і прилади, які використовуються, місця їх установки, схеми завантажень, методики зняття експериментальних даних, способи обробки й аналізу результатів, заходи з техніки безпеки.

Особливостями натурних обстежень і довготривалих випробувань є: проведення робіт в обмежених умовах на діючих підприємствах або будівлях і спорудах, які експлуатуються – реальні, а не завдані дослідниками навантаження й інші впливи, неможливість виключення різних завад і довготривалих несприятливих впливів на прилади – неможливість використання громіздких, які заважають нормальній експлуатації, приладів і установок; відсутність у ряді випадків можливості підключення потрібної напруги для живлення приладів. Все це потребує приладів, слабочутливих до завад, невеликих за розмірами, довговічних, які не знижують своїх показників в часі і за несприятливих впливів, швидко встановлюються і настроюються, мають автономне живлення.

Тому для таких умов підходять магнітопружні давачі – для дослідження напружень у конструкціях; компаратори – фотопружні давачі – для визначення деформацій; магнітопружні або тензорезистивні перетворювачі – для визначення навантажень; марки або компаратори – для визначення розкриття тріщин; геодезичні прилади – для вимірювання кутових, лінійних переміщень, зсувів у вуз-



лах і частинах споруд для оцінки їх просторової роботи; струнні перетворювачі – для визначення напружень під основою фундаменту і біля основи; вібродавачі, які можна встановлювати в інвентарних колодязях, – для вивчення параметрів вібрацій.

Стаціонарні прилади поміщають у спеціальні захисні корпуси, з'єднувальні кабелі у сталених захисних оболонках підводять до комутаційної шафи, яка закривається на ключ. Під час чергового зняття показів дослідник підключає вимірювальний прилад до з'єднувальних колодок, які знаходяться у шафі, вимірює, а потім відключає прилад і закриває шафу. Якщо у дослідженнях (обстеженнях) застосовують прилади, які новинні постійно тривалий час заміряти і фіксувати які-небудь параметри (наприклад, деформації підкранових балок для виявлення фактичних навантажень від мостових кранів), то в середину комутаційної шафи поміщають самописець, який може під'єднуватись за допомогою кінцевого вимикача, розташованого на крановому шляху.

Доцільно користуватись простими та надійними приладами для визначення деформацій будь-яких конструкцій – фотопружними давачами (рис. 9.2). Вони являють собою пластинки фотоактивного матеріалу 1, приклеєні по краях до конструкції 5. Заміряють деформації спеціальними накладними полярископами; якщо на поверхні пластинки наклеєна поляризаційна плівка, то під час деформації спостерігач бачить чергування темних і світлих смуг, що може дати наближену інформацію про знаки і величини деформацій.

В основі застосування магнітопружних перетворювачів – магнітопружний ефект, який полягає у зміні магнітних властивостей (магнітної проникливості та ін.) феромагнетика під дією механічних напружень. Найбільш прийнятною формою чутливого елемента для забезпечення високої чутливості до зміни магнітної проникливості є тороїдальний (рис. 9.3). Магнітопружні перетворювачі можуть бути закладними (встановлені у бетон під час виготовлення конструкції) або накладними.

Тороїдальний чутливий елемент складається з феритового кільцевого сердечника магнітопроводу 1 з тороїдальною обмоткою 2 і з'єднувальними проводами 3 для підключення до приладу. Якщо обмотку живити змінним струмом з частотою до 20 000 Гц і стискати вздовж нормальної осі кільця, то на виході чутливого елемента можна одержати осцилограму 5, яка зафіксує про зміну пікового напруження (у декілька вольт) залежно від стискальної сили або напружень стиску.

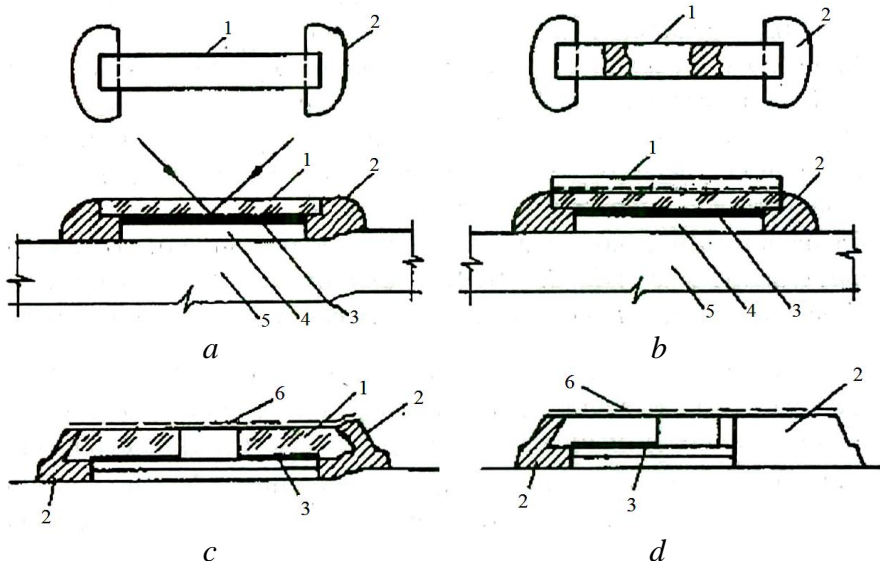


Рис. 9.2. Фотопружні давачі: *a, b* – стрічкові; *c, d* – круглі: 1 – фотоактивна пластина; 2 – клей; 3 – відбивальний шар; 4 – гумова прокладка; 5 – досліджуваний об’єкт; 6 – поляризаційна плівка.

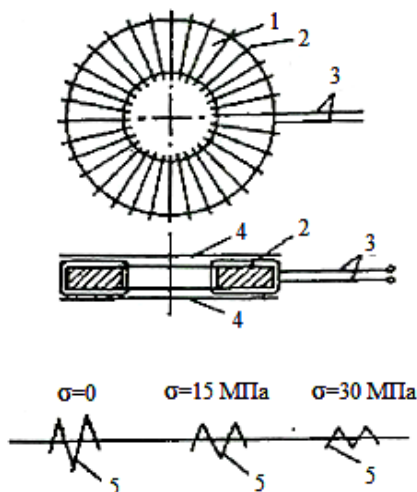


Рис. 9.3. Магнітопружні давачі: 1 – тороїдальний сердечник; 2 – обмотка; 3 – виводи; 4 – фольга; 5 – осцилограми.

На робочих поверхнях, де магнітопружний перетворювач контактує з бетоном, на нього наклеєна фольга з титану або нікелю 4, а крайові зони залиті клеєм. Завдяки цьому давач зберігається у бетоні, рідина не проникає у прилад, а також зводиться до мінімуму поперечна чутливість і зліквідовується концентрація напружень по краях.

Магнітопружні давачі різних типів мають робочі діапазони з напруженням стиску 1...10 МПа, 5...50 МПа, діаметр 27...78 мм, то-

вищипу 9...6,9мм. Отже, створені методика і вимірювальна система для довготривалих досліджень напружень у бетоні залізобетонних конструкцій з допомогою магнітопружних давачів. Давачі (М75, М40, М30, М20) прямого визначення напружень встановлюють всередину елемента перед бетонуванням, після монтажу елементів будинку їх під'єднують до реєструвального пристрою приладу ВРМ-4, який містить мікропроцесорний комплекс для вимірювання, запам'ятовування, математичної обробки й індикації результатів. Готові дані після обробки виводяться на дисплей. Одночасно можна підключити 18 магнітопружних давачів.

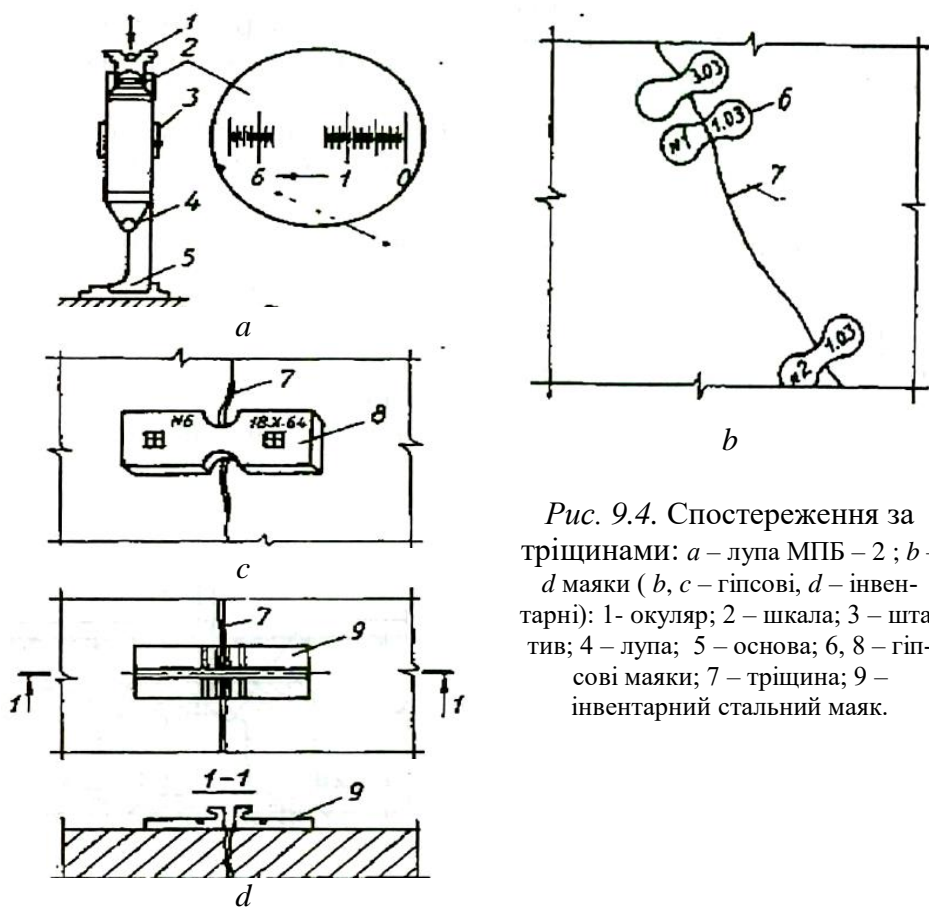


Рис. 9.4. Спостереження за тріщинами: а – лупа МПБ – 2 ; б – d маяки (b, c – гіпсові, d – інвентарні): 1- окуляр; 2 – шкала; 3 – штатив; 4 – лупа; 5 – основа; 6, 8 – гіпсові маяки; 7 – тріщина; 9 – інвентарний сталевий маяк.

Під час натурних обстежень (досліджень) необхідно вести довготривалі спостереження за утворенням і розкриттям тріщин. На будівельні конструкції встановлюють поперек (перпендикулярно) до тріщини маяки, розташовані, зазвичай, через 50...100 см по довжині

тріщини. Для довготривалого спостереження за розкриттям тріщини можна використовувати лупу МПБ-2, маяки, компаратори (рис. 9.4).

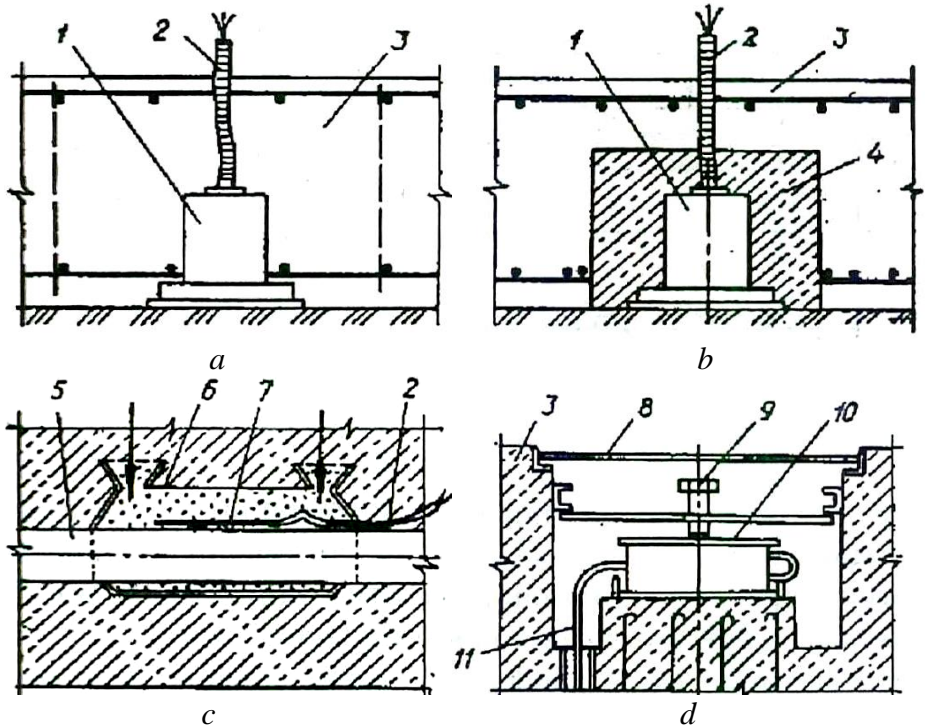


Рис. 9.5 Установка апаратури для довготривалих випробувань: *a - c* – закладної; *d* – знімної: 1 – датчик; 2 – кабель; 3 – досліджувана конструкція; 4 – бетонний блок; 5 – арматура; 6 – поліетилен; 7 – тензорезистор; 8 – кришка люка; 9 – притискальний гвинт; 10 – вібронадвач; 11 – комутаційний дріт.

Лупа являє собою мікроскоп з 20-кратним збільшенням, що дозволяє визначити ширину розкриття тріщини з похибкою 0,05 мм. Маяки можуть бути одноразові (із гіпсового розчину) або інвентарні, металеві. На гіпсовому, який на місці перетину з тріщиною має зменшений переріз, записують дату установки і його номер. При розкритті тріщини переміщення двох частин маяка заміряють лупою МПБ-2 або компаратором. Для замірів компаратором використовують риски (рис. 9.4, *c*).

Для довготривалих випробувань застосовують такі способи установки приладів на конструкціях.

- установка "закладної" апаратури - датчиків разом з кабелями в бетон споруди під час будівництва (при цьому неможливо їх вийняти, ремонтувати чи замінити);

– установка апаратури в спеціально влаштованих під час будівництва виїздах чи камерах, які закриваються кришками (при цьому є можливість їх виймати).

Закладну апаратуру краще встановлювати при статичних довготривалих випробуваннях, а знімку при дипамічних (рис. 9.5).

Закладку апаратуру встатовлюють двома способами:

– монтажем герметичних контейнерів з закріпленням їх до опалубки конструкції чи арматурного каркаса для запобігання зсуву під час бетонування (рис. 9.5, а);

– попереднім бетонпущаючим давача в бетоному кубі з наступним встановленням їх в опалубку (рис. 9.5, б), що забезпечує надійніший захист давача.

Під час встановлення тензорезисторів на арматурі їх необхідно захищати від вологи. Для цього влаштовують захисні сорочки із розплавленого поліетилену, епоксидного клею та інших матеріалів, які заливають у знімну форму (рис. 9.5, с).

Знімну апаратуру, наприклад вібродавачі, встановлюють у спеціально влаштовані при будівництві камери, які закривають інвентарними кришками (рис. 9.5, д). Це дає змогу періодично тарувати, обслуговувати та налагоджувати цю апаратуру.

## 9.2. Обстеження і випробування основ і фундаментів

Будівлі і споруди опираються на фундаменти і основи, на них передаються всі навантаження, дії і впливи від конструкцій. Від стану основ і фундаментів значною мірою залежить надійність всієї будівлі або споруди, оскільки вихід з ладу цих елементів обов'язково викликає руйнування і вище розташованих конструкцій [41].

Через необхідність забезпечити особливу надійність основ і фундаментів важливим завданням є правильно їх обстежити і випробувати. Ця задача ускладнюється недоступністю або важкодоступністю до основ і фундаментів для безпосередніх спостережень, а також великою кількістю різних видів ґрунтів, складністю їх структури, можливою зміною характеристик (наприклад, під час змочування), що вимагає організації довготривалих спостережень з допомогою достатньо надійних методів [217].

Довготривалі дослідження основ і фундаментів потрібні також для отримання даних про інженерно-геологічні процеси, пов'язані з експлуатацією таких споруд. Завдяки цьому можна виявити причини розвитку й активізації цих процесів і розробити ефективні захисні заходи. Особливо важливе це питання для районів з зсувонебез-

печними ділянками, слабкими ґрунтами, активним розвитком фізико-геологічних процесів, а також у сейсмонебезпечних.

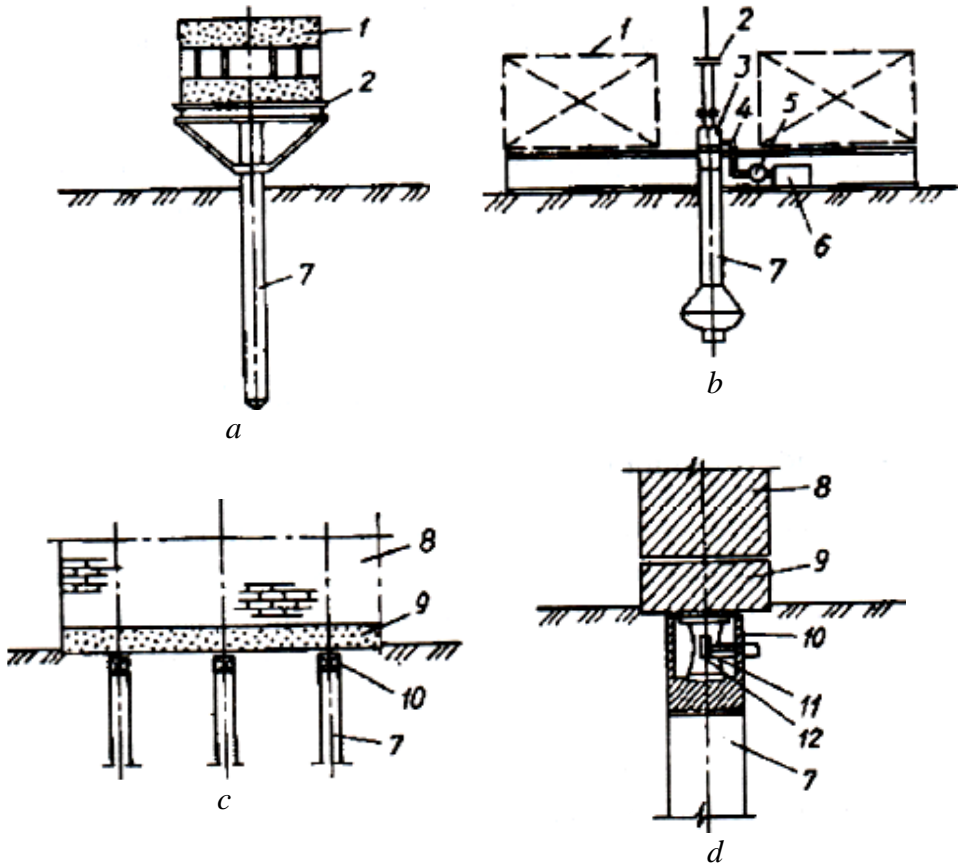


Рис. 9.6. Способи вимірювання навантажень під час натурних випробувань: *a, b* – випробування паль; *c, d* – визначення навантаження на палі в будівлі: 1 – вантаж; 2 – платформа; 3 – домкрат; 4 – шланг; 5 – манометр; 6 – насосна станція; 7 – паля; 8 – стіна; 9 – розтверк; 10 – корпус динамометра; 11 – пружний елемент; 12 – тензорезистори.

Виділення сфери взаємодії споруди з геологічним середовищем (основою) дає можливість виявити ступінь і характер впливу споруди на основу і визначити активізацію інженерно-геологічних процесів як реакцію основи. Для цього потрібно знати розташування, призначення, умови експлуатації споруди, основні дані про геологію і гідрогеологію ділянки, положення і прогноз зони розвитку таких процесів. Так, наприклад, можна встановити, чи викликає експлуатація споруди вібрацію, розрідження, зволоження, обводнення, вимивання, розморожування, стиснення, зсув основи і т. ін.

Залежно від характеру впливу виділяють сферу взаємодії споруди і основи, у межах якої необхідно вивчити основи: при вічномерзлих групах – теплофізичним розрахунком виявляють зону можливого розморожування, при просадках – просадкову зону, при значному додатковому стиску – за формулами механіки ґрунтів обчислюють зони напружень і т. ін.

Під час дослідження і випробування основи та фундаменту звичайно визначають: для основи – пороговий тиск, нормальні і дотичні напруження, переміщення, фільтрацію води, щільність, вологість, літологію й ін., для фундаментів – розподіл напружень вздовж контакту з основою, міцність, переміщення, тріщиностійкість, фактичний (дійсний) стан, дійсне зовнішнє навантаження. Напружено-деформований стан фундаментів виявляють за допомогою методик і приладів. Для дослідження основи розроблені спеціальні прилади і методи. Навантаження, що діють на фундамент, можна виміряти шляхом попереднього зважування вантажів, які вкладають на платформу; заміром тиску масла у системі “гідравлічний домкрат - насосна станція” з попередньою перевіркою; встановленням тензорезистивного перетворювача між конструкцією фундаменту і зовнішнім навантаженням (рис. 9.6). Перші два способи використовують під час короточасних випробувань окремих конструкцій, наприклад, паль, третій спосіб – під час довготривалих навантажень будівель і споруд.

### 9.3. Вимірювання тисків і напружень у ґрунтах

Оцінити міцність ґрунту можна визначенням порового тиску (тієї частини повного напруження, яке передається на воду у порах). Поровий тиск потрібно знати для виявлення ущільнення водонасиченого ґрунту: спочатку все додаткове навантаження, прикладене до ґрунту, сприймається водою у порах, а на його скелет (тверді частинки) тиск не передається; з ущільненням ґрунту і відтисненням води поровий тиск знижується до нуля, все навантаження передається па скелет ґрунту і ущільнення припиняється. Поровий тиск визначають пороп’езометрами, які можна суміщати з приладами для визначення щільності ґрунту - пенетрометрами.

Для заміру нормальних і дотичних напружень і їх напрямку на контакті двох тіл (фундаменту і ґрунту, конструкцій й опорної частини та ін.) використовують месдозы тиску і тертя. Месдозы можуть бути контактними (розташованими на контакті фундаменту та ґрунту) і ґрунтовими (закладеними в ґрунт). Ними можна заміряти си-

ли тиску і тертя ґрунту по фундаменту.

Месдози ділять на мембранні тензорезисторні і мембранно-балкові, мембрани, струни, протитискні, магнітопружні та ін. Найбільше поширення знайшли мембрані і струнні (рис. 9.7).

Мембранна тензорезистивна месдоза складається із жорсткого корпусу з прикріпленою кришкою (гнучкою пружною мембраною 1), яка контактує з ґрунтом. З внутрішньої поверхні мембрани наклеєний тензорезистор 2 (наприклад, кільцевий), який реагує на невеликі прогини мембрани. Для виключення концентрацій крайових напружень на краях мембрани зроблені кільцеві виточки 4, заповнені традиційно пористою гумою 5. Деформативність мембрани підбирають так, щоб жорсткість месдозі відповідала жорсткості матеріалу, у якому вона розташовується.

Перед випробуванням месдозі градуують у спеціальному пристрої (частіше – у баку, в якому створюється контрольований розподілений тиск води або повітря, або у ґрунті). Для кожної месдозі будуть градуувальний графік, котрий повинен бути прямолінійний при створенні і знятті навантаження і не мати петель. Похибка вимірювань не має перевищувати 5...10%. При градуванні месдоз на ґрунті він повинен бути такого ж складу і тієї початкової щільності, що і прийнятий у дослідях.

У мембранно-балковій месдозі (рис. 9.7, б) вимірювальним елементом є металева балочка із тензорезистором 2. Від гнучкої мембрани 1 переміщення передаються на балочку 8 за допомогою гвинта. Поряд з активним тензорезистором, наклеєним на балочку, у месдозі повинен бути термокомпенсаційний, зазвичай, наклеєний на жорсткий корпус 3; можна наклеїти два тензорезистори у стиснутій і розтягнутій зонах балочки, що підвищує чутливість месдозі. Розроблена конструкція кубічної месдозі (рис. 9.7, с), в якій об'єднані месдозі тиску і тертя. Вона дозволяє вимірювати всі складові напруження у точках основи. У месдозі тертя жорстка кришка може переміщатися на кульках 6 відносно корпусу, при цьому гнучка мембрана 7 реагує на горизонтальні переміщення. На мембрану наклеюють тензорезистор 2. На шести гранях кубічної месдозі розташовують три месдозі тиску і три тертя.

Складнішою є мембрана групової месдозі (рис. 9.7, d). Тут обидві поверхні мембрани – робочі, гнучкі. Вона складається із гнучкого корпусу (з двома мембранами), заповненого рідиною, найчастіше дистильованою водою, щоб не допустити появи бульбашок повітря. Від корпусу відходить тонка трубка, на кінці якої встановлюють



капілярну скляну трубку із міліметровими поділками. Меніск пофарбованої рідини повинен бути видимим у скляній трубочці. Під час створення тиску ґрунту на месдозу меніск рідини переміщується у капілярній трубочці, що дозволяє оцінювати величину тиску ґрунту.

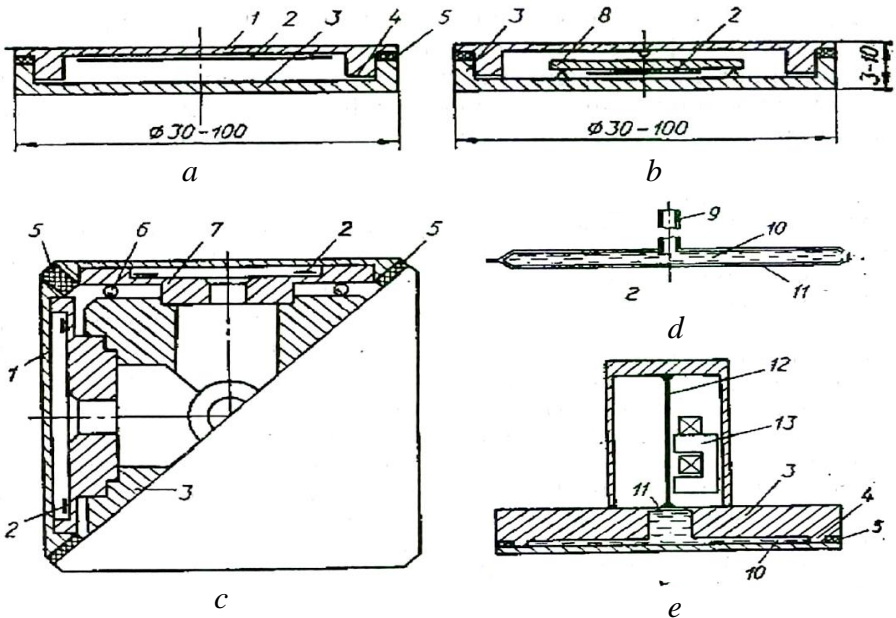


Рис. 9.7. Месдозы: *a* – тензорезисторна; *b* – з балочкою; *c* – комплексна кубічна; *d* – гідравлічна; *e* – струнна: 1 – покриття месдозы тиску; 2 – тензорезистор; 3 – корпус; 4 – кільцева виточка; 5 – пружна прокладка; 6 – кульки; 7 – вимірювальний елемент месдозы тертя; 8 – балочка; 9 – трубка; 10 – рідина; 11 – мембрана; 12 – струна; 13 – електромагніт.

Широко розповсюдженою та надійною для довготривалих випробувань є струнна месдоза конструкції НДІБК (Київ) (рис. 9.7, *e*). Тут переміщення мембрани 11 передаються натягнутою сталевією ниткою (струною) 12, яка міняє частоту власних коливань залежно від ступення натягу. Таким чином, робота струнних месдоз аналогічна роботі струнних тензометрів. Для більшої чутливості месдозы у корпусі зроблена порожнина, заповнена рідиною 10. Електромагніт 13 реагує на коливання струни 12.

#### 9.4. Вимірювання деформацій і фільтрації ґрунтів основи

Деформацію та переміщення в основах під фундаменти вимірюють з допомогою ґрунтових (у натурних або лабораторних вимірюваннях) або кільцевих марок у натурних умовах, наприклад, під

час визначення спучування ґрунту при промерзанні (рис. 9.8) [127, 128]. Ґрунтові марки являють собою гвинтові лопатки 6, які загвинчують в основу ключем вручну на потрібну глибину. До лопаток кріплять перед загвинчуванням сталевий дріт 4 діаметром 0,1...0,3 мм, одягнутий у пластмасову оболонку 5 з внутрішнім діаметром 2...3 мм. Дріт покривають шаром мастила, щоб позбутися тертя між оболонкою і дротом. Кінці дроту приєднують до прогиномірів, які фіксують деформації (переміщення) ґрунтових марок. Для довготривалих спостережень за деформаціями шарів ґрунту у пробурену свердловину 8 діаметром до 5...10 см через трубку встановлюють кільцеві марки 9, які при виході із неї закріплюються до стінок свердловини з допомогою пружних анкерів. Потім у свердловину опускають магнітний шукач 17, який точно фіксує положення сталевого кільця. Довжина підвіски 10 фіксується на приладі 7, внаслідок чого можна періодично фіксувати деформації марок 9 по вертикалі.

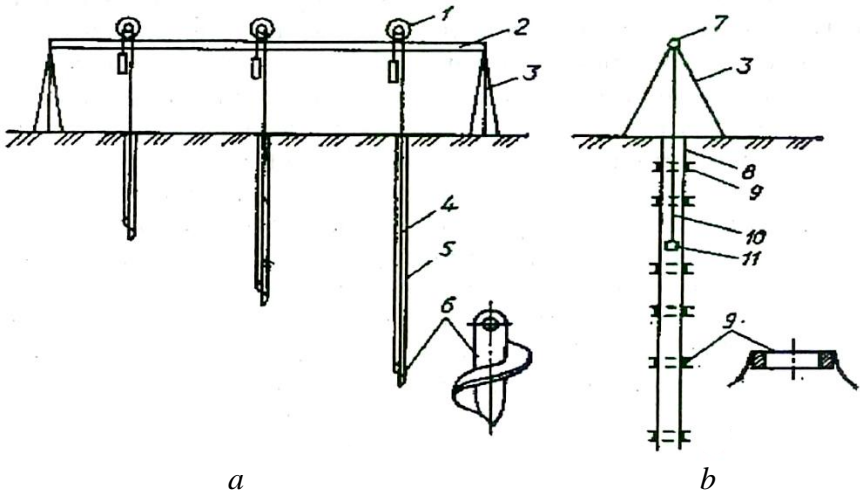


Рис. 9.8.. Вимірювання переміщень ґрунтів: *a* – установка глибинних марок; *b* – вимірювання переміщень під час проморожування: 1 – прогиноміри; 2 – балка; 3 – підставка; 4 – струна; 5 – пластмасова трубка; 6 – марка; 7 – прилад для контролю марки; 8 – свердловина; 9 – глибинна кільцева марка; 10 – підвіска; 11 – електромагніт.

Для встановлення фільтраційних властивостей ґрунтів, оцінки однорідності окремих шарів, виявлення тріщинуватості окремих зон основи, контролю фільтраційного режиму, аналізу ефективності дренажу застосовують метод радіоактивних індикаторів. Він полягає у спостереженні за рухом радіоактивних сполук, уведених у досліджуваний потік, який рухається разом з ним. Наявність радіоак-

тивних індикаторів у потоці ґрунтової води встановлюють радіометричними вимірюваннями безпосередньо у пробурених свердловинах або у відібраних із них пробах води.

З допомогою методу радіоактивних індикаторів легко визначити напрямок і швидкість руху ґрунтових вод, використовуючи дуже низькі концентрації радіоактивної речовини, яка не впливає на властивості потоку. Відомі три способи застосування радіоактивних індикаторів: пускової свердловини, свердловин для спостереження, координатних вимірювань.

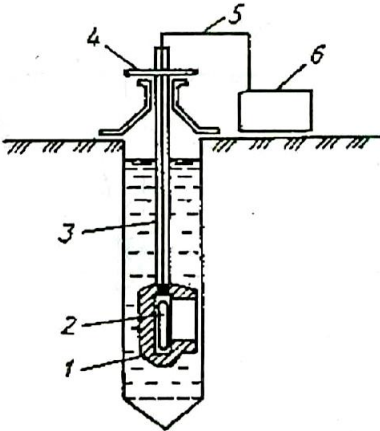


Рис. 9.9. Зонд: 1 – коліматор; 2 – детектор; 3 – штанга; 4 – лімб; 5 – кабель; 6 – реєстратор.

Перший спосіб ґрунтується на визначенні інтенсивності зниження концентрації радіоактивного індикатора у свердловині та напрямку його виносу потоком із неї. Індикатор вводять у пробурену свердловину і спостерігають за зміною його концентрації  $A$  за час досліду  $\tau$ , далі визначають постійну витрату потоку ґрунтових вод  $q$  і швидкість  $u$ :

$$q = \frac{V_0}{\varepsilon \tau} \ln \frac{A_0}{A}; \quad u = \frac{q}{w}, \quad (9.1)$$

де:  $V_0$  – об’єм свердловини;  $\varepsilon$  – емпіричний коефіцієнт, який враховує порушення потоку свердловини (для чистих ґрунтів  $\varepsilon=2$ );  $A_0$  – концентрація індикатора при  $\tau=0$ ;  $A$  – концентрація у кінці досліду;  $w$  – площа поперечного перерізу свердловини.

Напрямок потоку визначають зондом з коліматором, який періодично повертають у свердловині, виявляючи графік розподілу радіоактивності у плані (рис. 9.9).

Другий спосіб базується на спостереженні за появою радіоактивного індикатора у ґрунті свердловин, розташованих нижче потоку. При використанні третього способу спостерігають за розподілом радіоактивного індикатора у ґрунті після введення його у свер-

дловину. Для цього відбирають проби ґрунту і направляють на дослідження або вводять у ґрунт зонди.

### 9.5. Геофізичні методи контролю основ і гірських порід

Геофізичні методи контролю основ і гірських порід – це радіоактивні методи, вертикальне електричне зондування, електропрофілювання, сейсмоакустичний метод, електричний і радіоактивний каротаж свердловин. Методами вертикального електричного зондування й електропрофілювання уточнюють геологічні розрізи за достатньої відмінності питомих опорів шарів гірських порід різних складів і стану в розрізі [127, 128].

Сейсмоакустичний використовують для оцінки ступеня тріщинуватості масивів скальних ґрунтів як основ споруд і механічних властивостей скалистих основ. Для обґрунтування проектування споруд, закладених на велику глибину (більше 50 м) або тих, які впливають на велику товщину основи, вживають каротаж свердловин. Комплексне використання геофізичних методів прискорює і здешевлює дослідження властивостей.

Щільність ґрунтів визначають гаммаскопічним методом - просвічування ґрунту пучком гамма-квантів. Метод використовують для пошарового визначення щільності до глибини 1,5 м (рис. 9.10). При цьому ступіць послаблення інтенсивності пучка гамма-квантів від джерела опромінювання 2, які проходять через ґрунт 1, залежить від щільності ґрунту. Послаблення пучка фіксує детектор 3. Щільність  $\rho$  визначають за формулою:

$$\rho = \frac{\ln I_0 / I}{\eta \mu d}, \quad (9.2)$$

де:  $I_0$  – інтенсивність опромінення за відсутності ґрунту;  $I$  – реєстрована інтенсивність;  $\eta$  – коефіцієнт, який враховує реєстрацію розсіяного опромінення ( $\eta < 1$ );  $\mu$  – масивний коефіцієнт послаблення гамма-опромінення;  $d$  – товщина шару ґрунту.

У методі розсіяного гамма-опромінення для визначення щільності ґрунтів у природному заляганні і насипних до глибини 20...30 м, застосовують радіометричні прилади, у яких джерело 1 і детектор 2 розділені екраном із свинцю 3 (рис. 9.11). Екран 3 поглинає пряме бета-опромінення, детектор 2 фіксує опромінення, розсіяне ґрунтом. Під час глибинного дослідження прилад спускають у свердловину діаметром 20...120 мм, при поверхневому – використовують накладний приклад.

Нейтронним методом визначають вологість ґрунтів у природному стані і у пасивних, на глибині до 30 м, контролюють замочу-

вання ґрунтів, наприклад, перед ущільненням. Поверхневі і глибинні вологоміри (рис.9.12) містять джерело швидких нейтронів і детектор 2, який реєструє теплові нейтрони, або захоплене гамма-випромінення, або те і друге. Під час вимірювань використовують зв'язок між водневмісним середовищем, яке в основному залежить від вологості, і щільністю потоку нейтронів. Тут краще використовувати алюмінієві і дюралюмінієві труби.

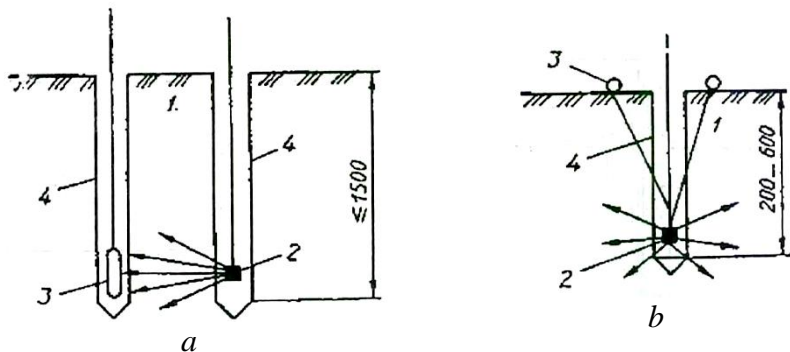


Рис. 9.10. Вимірювання щільності (густини): 1 – ґрунт; 2 – джерело випромінювання; 3 – детектор; 4 – свердловина

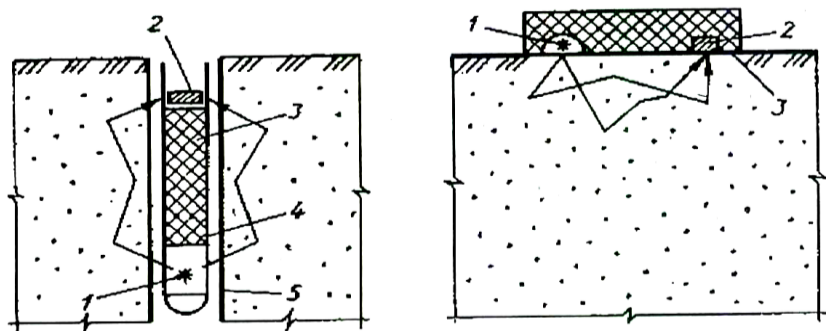


Рис. 9.11. Метод розсіяного гамма-випромінення: а – глибинний давач; б – поверхневий; 1 – джерело опромінення; 2 – детектор; 3 – екран із свинцю; 4 – корпус; 5 – свердловина

Для сейсмоакустичного і електричного каротажу застосовують комплекс малогабаритної апаратури, розробленої у Гідропроєкті ім. С. Я. Жука (рис. 9.13). Цей комплекс дозволяє встановити тріщинуватість скельних порід, виділити послаблені зони, виявити літологію фільтраційних і температурних полів. До складу комплексу, який розташований у автомобілі УАЗ, входять пристрої для точкового і неперервного (у напівавтоматичному режимі) ультразвукового каротажу, електрокаротажу, вузли для реєстрації (аналоговий і магнітний) і для сухих свердловин - вузол точкового акустичного

каротажу. Комплекс містить для основного модуля, електронно-променевий осцилограф 6, касетний магнітофон 5 і декілька зондів 7, 8, 9 для свердловин.



Рис. 9.12. Нейтронний метод: *a* – глибинний вологомір; *b* – поверхневий; 1 – катодний перетворювач; 2 – детектор; 3 – джерело швидких нейтронів; 4 – гільза; 5 – обсадна труба

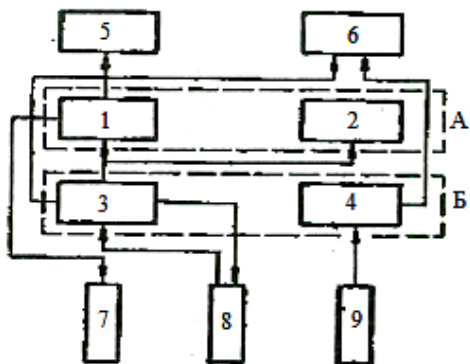


Рис. 9.13. Апаратура для каротажу: *A* – модуль каротажу; *B* – модуль акустичного каротажу; 1 – блок перетворювача; 2 – аналоговий реєстратор; 3 – блок ультразвукового каротажу; 5 – касетний магнітофон; 6 – осцилограф; 7-9 – зонди

Під час ультразвукового каротажу збуджувальний імпульс від блоку 3 надходить на зонд 8, від нього – на осцилограф 6 або аналоговий реєструвальний пристрій 2 для реєстрації у вигляді діаграми, або через перетворювач у блоку 1 на – касетний магнітофон 5. Під час акустичного каротажу пружна хвиля збуджується ударом молотка або вибухом, сигнал від зонда 9 поступає через блок 4 на осцилограф 6. Під час електрокаротажу від блоку 7 сигнал надходить на зонд 7, далі через блок – на реєстратор 2 або через перетворювач – на магнітофон 5. Блок електрокаротажу дозволяє вимірювати опір, термометрі у масштабі 19С на 1 см, кавернометрію у діапазоні зміни діаметра свердловини 50...350 мм.

Під час гамма – та нейтронного каротажу використовують ядерногеофізичні методи. При цьому вивчають не тільки інтенсивність випромінення, але й енергетичний спектр. Застосовують одноканальну малогабаритну апаратуру РСК-М або двоканальну

ДРСТ-3-60, яка має зонди довжиною 30...50 см (при гамма-каротажі) і 40...60 см (при нейтронно-гамма-каротажі).

Глибина свердловини 50...1200 м при діаметрі 90...325 мм, швидкість підняття зонду 90...130 м/год. Використовують також аналогові каротажні станції СКВ-69, АЗСК-900, АЗКС-1500, СК-1, а для важкодоступних місць – легку апаратуру ПРКС-2.

Тими методами уточнюють літологічний і розчленовують геологічні розрізи, виявляють глинисті шари, оцінюють щільність, пористість, вологість. Похибка вимірювань щільності  $\rho = 0,03...0,1$  т/м<sup>3</sup>, вологості – 5...10%. Відомі непетраційно-каротажні станції (наприклад, СПК-1), у яких глибинні зонди вимірюють лобовий опір, бокове тертя і одпочасто трьома давачами виконують радіоактивний каротаж – визначають рівень ґрунтових вод, щільність, вологість, міцність, деформативність, ступінь однорідності і витримності ґрунтів.

## 9.6. Висновки до розділу 9

Тривалі дослідження будівельних конструкцій, основ і фундаментів, результати яких наведені у цьому розділі дали змогу сформулювати методику дослідження і випробування на довготривалі навантаження. Зокрема, встановити типові місця можливої дії додаткових впливів і пониженою довговічність. Обстеження основ і фундаментів розробити способи вимірювання тисків і напружень у ґрунтах із застосуванням розроблених месдоз. Розроблено і описано також геофізичні методи контролю основ і гірських порід. Результати цих досліджень дали змогу встановити такі висновки:

1. Натурні обстеження необхідні для визначення реального стану матеріалів, конструкцій будівель і споруд у зв'язку із фізичним і моральним старінням. Довготривалі випробування з метою визначення дійсної роботи та удосконалення методів розрахунку і конструювання та виявляють впливи різних факторів на будівлю. Тут сформовано, і на основі тривалих досліджень, типові та найбільш імовірні місця впливу цих факторів розглянуті: для основ, для фундаментів, для колон, для двогілкових колон, для ригелів, для покриттів і для стін які показано на *рис. 9.1*. Для довготривалих досліджень відповідні способи установки приладів на конструкціях.

2. Результати обстеження і випробування основ і фундаментів є дуже важливою задачею так, як від стану основ і фундаментів залежить і надійність всієї будівлі чи споруди. Під час дослідження необхідно зазначити для основ пороговий тиск, нормальні і дотичні

напруження, переміщення, фільтрацію води, щільність, вологість, літологію й ін., для фундаментів – розподіл напружень, міцність, переміщення, тріщиностійкість, фактичний стан та дійсне зовнішнє навантаження і переважна більшість факторів в часі може змінюватись. Тут наведено також основні способи вимірювання навантажень під час випробувань.

3. На підставі довготривалих досліджень сформульовано основні методи вимірювання тисків і напружень у ґрунтах. Представлено різного типу месдозы, а найбільше поширення отримали мембранні і струнні. Детально описано у цьому розділі і вимірювання деформацій і фільтрації ґрунтів основи та наведено схему вимірювання переміщень ґрунтів та їх зондування.

4. Створено різні геофізичні методи контролю основ і гірських порід – це переважно радіоактивні методи. Зокрема, сейсмоакустичний, використовують для оцінки тріщинуватості масивів, а щільність ґрунтів визначають гаммаскопічним методом. Описано і наведено схему вимірювання щільності та схему вимірювання методом розсіяного вимірювання, використовують і інші методи.



## 10. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ МОСТІВ

### 10.1. Обстеження мостів

Мостові споруди експлуатуються у складних умовах – вплив ваги транспортних засобів та пішоходів, вітру, водних потоків, атмосферних явищ, сонячної радіації, замерзання і відтаювання тощо. Тому необхідно періодично їх досліджувати та обстежувати, щоб гарантувати надійну, безпечну та безаварійну експлуатацію.

Обстеження дає потрібні дані про основні параметри споруди, характеристики матеріалів та технічний стан елементів. Отримані результати впливають на аналіз стану споруди, а ступінь їх достовірності значною мірою залежить від суб'єктивних факторів і кваліфікації виконавців. Тому доручають такі роботи підготовленим спеціалістам, які користуються розробленими і погодженими програмами, відповідними приладами і обладнанням, дотримуються вимог нормативних документів [82, 127, 128, 171].

Під час обстеження мостів і труб ознайомлюються з технічною документацією; оглядають споруду, виявляють та фіксують дефекти, фотографують; здійснюють контрольні вимірювання та інструментальну зйомку; визначають характеристики та стан матеріалів; аналізують результати обстеження, складають висновки та рекомендації для подальшої експлуатації.

Обстежують такими етапами:

– попередньо: ознайомлення з технічною документацією та її аналіз; загальний огляд конструкцій та виявлення найбільш суттєвих пошкоджень та аварійних елементів; складання програми детального обстеження чи випробування;

– детально: обмірювання конструкцій; визначення фізико-механічних характеристик матеріалів; виявлення та обмірювання дефектів і пошкоджень, складання відомості дефектів; аналіз результатів детальних обстежень, складання висновків та технічного заключення про стан моста;

– спеціально: тривалі високоточні геодезичні спостереження та вимірювання деформацій, осідань, кренів; натурні статичні, динамічні випробування, дослідницькі роботи з визначенням технічного стану моста.

Крім того, виконують маршрутні обстеження, під час яких контролюють (як правило, за скороченою програмою) всі штучні споруди на певних дорогах або їх ділянках (маршрутах).

Окремо викопуються також поточні, періодичні та спеціальні

огляди [210, 211, 238].

Поточний огляд елементів мостів проводять не рідше одного разу в півроку, а також при значних впливах на мости: перед льодоходом та паводком, які відбуваються в непередбачені терміни, і після них; мости із прольотними будовами із сталі, схильні до крихкого руйнування – при різкому зниженні температури в зимовий період. Основне завдання поточних оглядів – виявити суттєві дефекти, які можуть впливати на надійність мостів.

Періодичні огляди є двох видів:

- післяпаводкові періодичні – встановлюють зміни в штучних спорудах після наводку шляхом попереднього і даного оглядів;
- післяремонтні – визначають повноту і якість виконаних ремонтних робіт великих обсягів.

Спеціальні огляди проводять спеціалізовані організації в таких випадках:

- після реконструкції чи капітального ремонту моста;
- при передачі споруди у відання іншої організації;
- у позачерговому порядку в сумнівних і аварійних випадках;
- за необхідності наднормативних навантажень;
- при виявленні поточними і періодичними оглядами залишкових деформацій у несучих конструкціях.

Спеціальні огляди залізобетонних мостів проводяться раз у 10 років; металевих – раз у 7 років.

Під час ознайомлення з технічною документацією вивчають елементи мостової споруди, принципи конструювання, армування тощо. Особливу увагу звертають на відхилення від затвердженого проекту, фізичні, механічні та хімічні характеристики використання будівельних матеріалів, документи з приймання окремих видів робіт, в першу чергу прихованих.

Ознайомлення з технічною документацією повинно включати і вивчення облікових документів експлуатаційних організацій: паспорта моста, журналу штучних споруд, карточки на міст. Важливо знати роки проектування та будівництва моста, тому що вони дають можливість встановити розрахункові навантаження, під які проектувалася споруда.

Необхідно також вивчити матеріали (звіти, заключения) раніше проведених обстежень та випробувань. Порівняння даних різних років дає змогу оцінити процеси, які відбуваються з елементами споруди, їх динаміку.

Для огляду мостових споруд необхідні спеціальні пристрої, риштування, підвісні люльки або драбини.

Під час огляду детально вимірюють геометричні розміри споруди, окремих елементів, вузлів, з'єднань. Якщо потрібно, то використовують ультразвукові прилади для визначення, наприклад, товщини захисного шару бетону, місць розташування та діаметра арматури.

Основна увага звертається на виявлення дефектів конструкцій. Так, у залізобетонних фіксують тріщини, сколи, раковини, порожнини в бетоні, оголення і корозію арматури, вилуговування і карбонізацію бетону. Пильно необхідно оглядати шви замоноличування, стики в збірних залізобетонних конструкціях, місця анкерування попередньо-напруженої арматури.

У металевих конструкціях виявляють корозію і тріщини, місцеві деформації (погнутості, вм'ятини, випучування), непрямолінійність стержнів головних ферм і в'язів. Особливо уважно вивчають стан заклепкових і болтових з'єднань, зварних швів.

Всі виявлені дефекти заміряють, заносять у відомість, вказують місце розташування дефекту, коротко описують його і дають характеристики заходів щодо його усунення. Перелік характерних дефектів мостів, їх опис і способи виявлення наведено в нормативних документах [41, 82, 171] та літературі [70, 71, 213, 214, 238].

Для замірювання конструкцій і розмірів дефектів використовують як прості інструменти – рулетки, мірну сталеву лінійку, штангенциркуль, так і лазерні дальноміри, ультразвукові товщиноміри та інші прилади, які значно підвищують продуктивність обстеження. Тріщини вимірюють лупою з точністю до 0,1 мм, а також мікроскопом Бріпелля з 24-кратним збільшенням.

Контрольними вимірюваннями та інструментальною зйомкою перевіряють незмінність положення всієї споруди загалом та окремих її елементів. З допомогою геодезичних інструментів (теодоліта, нівеліра) знімають план головних ферм і балок; поздовжні профілі проїзної частини, головних ферм та балок; поперечні та поздовжні профілі головних ферм, балок, проїзної частини; висотне положення характерних частин опор моста і т.ін.

Зйомка планів та профілів дає важливу інформацію про технічний стан споруди. За планом прогонової будови визначають горизонтальні зміщення головних балок та ферм, випучування стиснутих поясів, нахили головних ферм та інші дефекти. Профілі показують загальне провисання ферм, залишкові прогини, різкі переломи у вузлах та інші відхилення, які свідчать про дефекти будівництва чи експлуатації. Важливі дані отримують, порівнюючи плани і профілі, зняті в різний час. При цьому визначають розвиток загальних і міс-

цевих деформацій в часі і прогнозують термін експлуатації споруди.

Інструментальною зйомкою визначають величини кренів, осадку та зсувів опор мостів. Для цього на опорах встановлюються відповідні марки, за допомогою яких і вимірюють величину деформацій.

Для оцінки несучої здатності споруди важливо знати фактичні характеристики її матеріалів. Дані технічної документації не завжди відповідають реальним, тому що в процесі експлуатації конструкція зазнає суттєвих впливів, під дією яких змінюються характеристики матеріалів.

Лабораторні дослідження зразків, взятих безпосередньо із конструкцій мостів, дають найбільш повні і достовірні дані про склад і механічні параметри матеріалів. Заготовки для стандартних зразків необхідно брати із робочих місць (по можливості слабо напружених), мінімально ослабляючи при цьому поперечний переріз елементів конструкцій. Ослаблені місця відновлюють або перекривають накладками.

Заготовки для виготовлення не менше трьох стандартних зразків вирізають ножівкою або автогеном. В останньому випадку розміри заготовок збільшують, тому що метал біля кромки різання змінює властивості, і його необхідно зменшити на глибину не менше 10 мм. Стандартні зразки випробовують на міцність під час розтягу і ударну в'язкість, а також виконують металографічний та хімічний аналізи.

Для лабораторних досліджень бетону вибураються циліндри діаметром 70... 150 мм, або керни, із яких випилюють куби стандартних розмірів. Зразки бетону необхідно вибирати без арматури, оскільки вона може вплинути на результати дослідження.

Слід зауважити, що лабораторні методи досліджень трудомісткі, пошкоджують і ослаблюють конструкцію, дають локальну інформацію. Для таких неоднорідних матеріалів, як бетон, такої інформації недостатньо.

Тому доцільно характеристики бетону визначати також неруйнівними методами: ультразвуковим, пластичної деформації та іншими в різних найбільш відповідальних місцях конструкцій мостів.

## **10.2. Статичні випробування мостів**

Статичне випробування – це завантаження мостів тимчасовим статичним навантаженням з вимірюванням переміщень, деформацій і зсувів у найбільш характерних перерізах, елементах і вузлах конструкцій, а також фіксацією та ступеню розвитку тріщин і сигналів акустичної емісії. Об'єм статичних випробувань залежить від розмірів моста, стану конструкцій і складності розрахункової схеми.

Попередньо міст обов'язково обстежують, розраховують випробувальні навантаження для безпечності (та достатності) випробувань згідно з вимогами [13, 14]. Програма випробувань повинна включати:

- мету і завдання;
- технічну характеристику споруди та її стану;
- розрахунки на нормовані та випробувальні навантаження;
- величини випробувального навантаження, схеми розташування і послідовність завантаження;
- необхідні риштування, підвісні люльки та інше обладнання;
- перелік, кількість та місця розташування приладів;
- перелік необхідних виконавців та технічного забезпечення (представників ДАІ, інших служб);
- заходи для забезпечення техніки безпеки під час випробувань.

Під час випробувань багатопрольотних мостів з однаковими прогонами вивчають детально, як правило, один прогін, а інші – за скороченою програмою, контролюючи, наприклад, прогини. В мостах з різними прогонами досліджують в першу чергу найбільші. Для оцінки вантажопідйомності моста випробовують ті прогонні будови та їх елементи, які мають дефекти, що найбільше знижують його несучу здатність.

Випробувальним навантаженням для автодорожніх мостів бажані однотипні вантажні автомобілі з баластом (щебенем, піском), рідше – гусеничне навантаження (танки), для залізничних – локомотиви і рухомий склад залізниці (рис. 10.1). Коли необхідні довготривалі навантаження (наприклад, опори), використовують бетонні блоки, ємності з водою і т.ін. Окремі елементи випробовують домкратами, лебідками, вантажами з фіксацією зусиль.

Нормами встановлено обмеження на зусилля, які виникають у мостах від випробувального навантаження. Так, діючий на сьогодні ДБН В.2.3-6-2002 вказує, що зусилля (сили, моменти), які виникають, не повинні перевищувати:

а) при випробуваннях споруд, розрахованих за методом граничних станів, – зусиль від тимчасового вертикального навантаження, прийнятого в проекті, при коефіцієнті надійності навантаження (чи коефіцієнті перевантаження), рівному 0,95 і повному динамічному коефіцієнті;

б) при випробуваннях споруд, розрахованих за допустимими напруженнями (за нормами, що діяли до 1962 р.), 110% зусиль від тимчасового вертикального навантаження, прийнятого в проекті, з повним динамічним коефіцієнтом;

в) під час випробувань споруд, що мають понижену несучу здатність і таких, на які немає технічної документації – зусиль від тимчасового вертикального навантаження, за а) і б), визначених розрахунком чинних нормативних документів з урахуванням фактичного стану конструкцій.



*a*



*b*

*Рис. 10.1.* Статичне випробування прогонових будов мостів завантаженими автомобілями: розташування навантаження впоперек (*a*) і вздовж (*b*) прольоту

У цьому ж нормативному документі ДБН В.2.3-6-2002 зафіксовано і нижню межу зусиль від випробувального навантаження, які не повинні бути меншими:

а) при випробуванні залізничних мостів, мостів під колії метрополітену чи трамваю – від зусиль найбільш важкого навантаження, яке обертається по даній лінії чи дорозі;

б) при випробуваннях автодорожніх і міських мостів – 65%, при обкатці 50% зусиль, вказаних як максимальні для даних елементів вище по тексті.

Транспортні засоби зважують з точністю до 5%. Вагу локомотивів та вагові характеристики порожнього рухомого складу залізниць, метрополітену, трамваю і автотранспорту допускається приймати за паспортними даними. Перед початком випробувань керівник повинен порівняти відповідність фактичних випробувальних навантажень і передбачених програмою та, за необхідності, уточнити зусилля в елементах, щоб не було перевантажень. Схеми завантаження розробляють, керуючись лініями впливу (поверхніми впливу) зусиль – сил, моментів. В процесі випробувань необхідно розташувати тимчасове навантаження так, щоб споруда або її елементи знаходилися в найневигодніших умовах роботи: зазнавали б найбільших прогинів, деформацій і т.ін. Оскільки випробовувати всі елементи моста практично неможливо, вибирають найбільш на-

пружені елементи та їх перерізи, які і піддають завантаженню, встановлюючи послідовно випробувальне завантаження вздовж і впоперек моста в найбільш не вигідне положення.

Для випробувань мостів малих прольотів потрібно невелику кількість автомобілів: як правило, 2–4 (рис. 10.2, і 10.3).

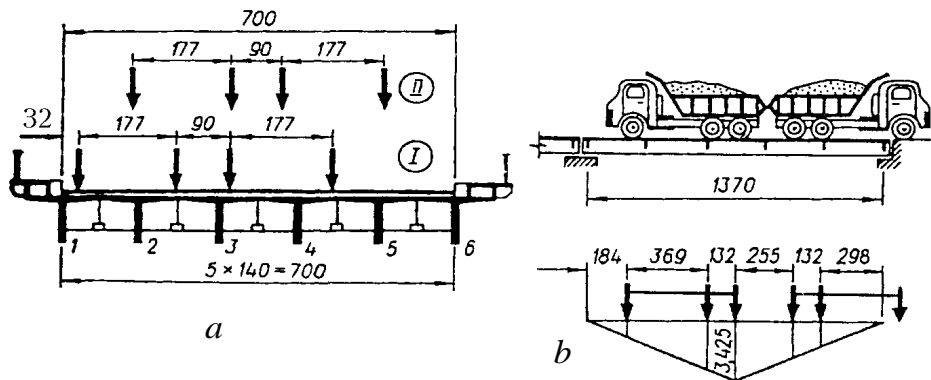


Рис. 10.2. Установка статичного випробувального навантаження на мосту малого прольоту:  
*a* – впоперек; *b* – вздовж прольоту



Рис. 10.3. Одностороннє (*a*) і симетричне (*b*) завантаження моста впоперек прольоту

В поперек прольоту навантаження із чотирьох автомобілів встановлюється за двома схемами: I – одностороннє навантаження (для створення максимальних зусиль у крайніх балках); II – симетричне (для створення максимальних зусиль у середніх балках). Вздовж прольоту автомобілі розташовують так. Один автомобіль задньою віссю над вершиною лінії впливу  $M_{0,51}$ , а другий – щільно до нього заднім бортом. Два інші автомобілі – аналогічно поряд з ними.

Під час випробувань мостів середніх і великих прольотів потрібна більша кількість автомобілів, які встановлюють на мостах за-

лежно від їх розрахункових схем. В балкових розрізних мостах колонами автомобілів завантажують весь проліт (рис. 10.4). При випробуванні ферми для дослідження роботи середніх розкосів навантажують ще й на половині довжини прольоту (рис. 10.4, b – схема завантаження II).

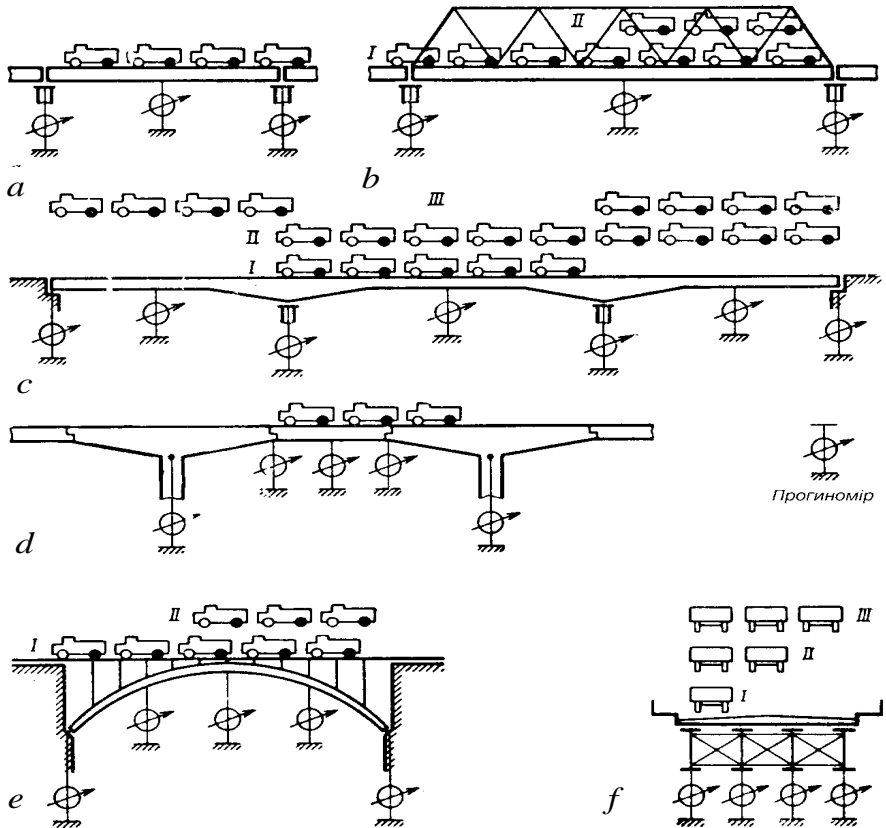


Рис. 10.4. Схеми установки навантаження і прогиномірів на мостах:  
 a – розрізних балкових; b – розрізних гратчастих балках (фермах);  
 c – нерозрізних; d – рамно-балкових з підвісними балками; e – аркових;  
 f – в поперечному перерізі

Нерозрізні прогонові будови завантажують вздовж моста не менше ніж трьома положеннями випробувального навантаження: I – спочатку середній проліт; II – крайній і середній; III – обидва крайніх прольоти (рис. 10.4, c).

Рамно-балковий міст з підвісними балками можна завантажувати тільки один раз вздовж моста (рис. 10.4, d). Аркові мости випробовують, завантажуючи за схемою I весь прогон для виявлення найбільших прогинів замкового перерізу і напружень у пере-



різах арок від найбільшого розпору, та завантажуючи за схемою II половину прогону, що викликає S-подібну деформацію осі арок і найбільші напруження в перерізах від згину (рис. 10.4, e).

По ширині проїзної частини навантажують поступово, поспідовно завантажуючи прогонову будову однією, двома, трьома колонами автомобілів (схеми I–III, рис. 10.4, f).

У кожному положенні навантаження (схемі завантаження) заміряють переміщення і деформації в характерних перерізах.

Прогини вимірюють, як правило, прогиномірами, які закріплюють до елементів мостів за допомогою струбцин або встановлюють на спеціальних стійках. Їх заміряють в серединах прольотів всіх балок та інших характерних місцях, за можливості – осадки опор (рис. 10.4).

Установка прогиномірів на конструкціях мостів має свої особливості, що обумовлено високим розташуванням балок над рівнем землі, значною глибиною річки під прогонами і т.ін. Тому пропонують, залежно від конкретних умов, використовувати різні схеми їх встановлення (рис. 10.5 і рис. 10.6).

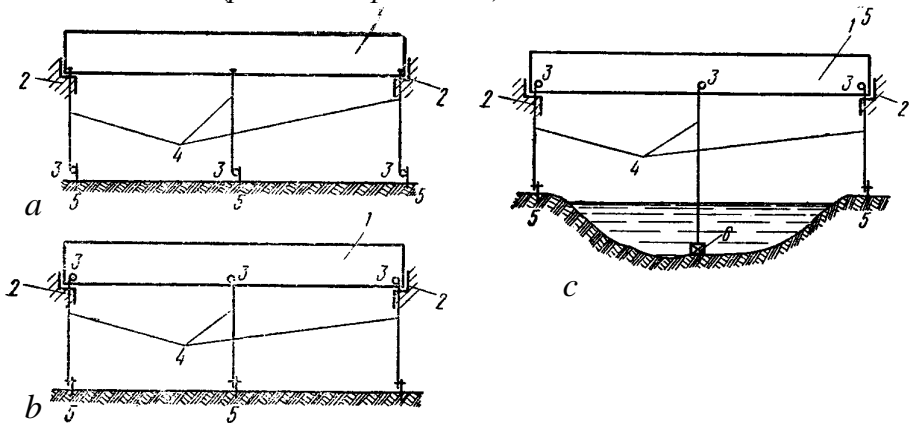


Рис. 10.5. Установка прогиномірів з дротяним зв'язком:

a – прогиномір знизу, кінець дроту закріплений до прогонової будови; b – прогиномір закріплений до прогонової будови; кінець дроту – до ґрунту; c – кінець дроту, закріплений до вантажу, опущеного на дно: 1 – прогонова будова; 2 – опори; 3 – прогиноміри; 4 – з'єднувальний дріт; 5 – стійки чи палі, закріплені в ґрунті; 6 – вантаж, опущений на дно річки

1. За наявності зручних умов на рівні землі та високих балок – прогиноміри встановлюють на стійках, які закріплені в ґрунті, кінець дроту кріпиться до балок моста (рис. 10.5, a).

2. При доступі до низу балок (невисоке розташування, наявність риштувань чи підвісних люльок) – прогиноміри закріплю-

ють струбцинами до балок, а кінці дроту – до паль, встановлених в ґрунті (рис. 10.5, b).

3. Якщо балки розташовані над водою, але течія не є швидкою, на дно опускають камінь з прив'язаним дротом (рис. 10.5, c).

4. Щоб позбутися впливу осадки опор, не ставлячи прогиномірів, використовують шпренгельну систему за схемою рис. 10.6, a. Підвішений дротяний стержень, який відтягується вниз вертикальним дротом з пружиною, забезпечує постійний натяг шпренгеля і нерухомість закріплення дроту прогиноміра.

5. Коли під прогоном моста швидкість течії річки значна, то необхідно влаштувати для кінця дроту нерухому точку. На рис. 10.6, b показано шпренгель, який відтягується підвішеним вантажем. Під час випробування ферм можна використати шпренгель, постійний натяг якого забезпечується пружиною, що з'єднує його вершину з верхнім поясом ферми (рис. 10.6, c).

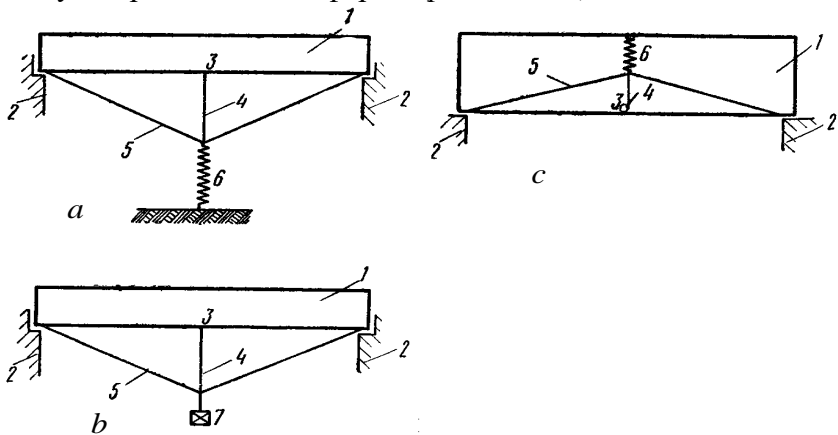


Рис. 10.6. Установка прогиномірів з дротяним зв'язком

з закріпленням дроту до шпренгеля: a – натяг шпренгеля пружиною; b – шпренгель з вантажем; c – підтягання шпренгеля з пружиною до верхнього пояса: 1 – прогонова будова; 2 – опори; 3 – прогиномір; 4 – з'єднувальний дріт; 5 – шпренгель із товстого дроту чи тросу; 6 – пружина, що натягує шпренгель; 7 – підвішений вантаж

Напруження в елементах мостів визначають, заміряючи відносно деформації тензометрами, тензорезисторами, компараторами, мікроіндикаторами на відповідній базі. Встановлюючи їх, необхідно враховувати нерівномірність розподілу напружень по перерізу і довжині елемента.

Тому під час вимірювань деформацій у стержнях металевих ґратчастих ферм тензометри (або тензорезистори, мітки для компаратора, бази для мікроіндикатора) встановлюють в середині її до-

вжини між з'єднувальними планками і рядами заклепок, а також на віддалі від стикових накладок. В перерізах елементів тензометри ставлять у крайніх (фібрових) волокнах (рис. 10.7, а).

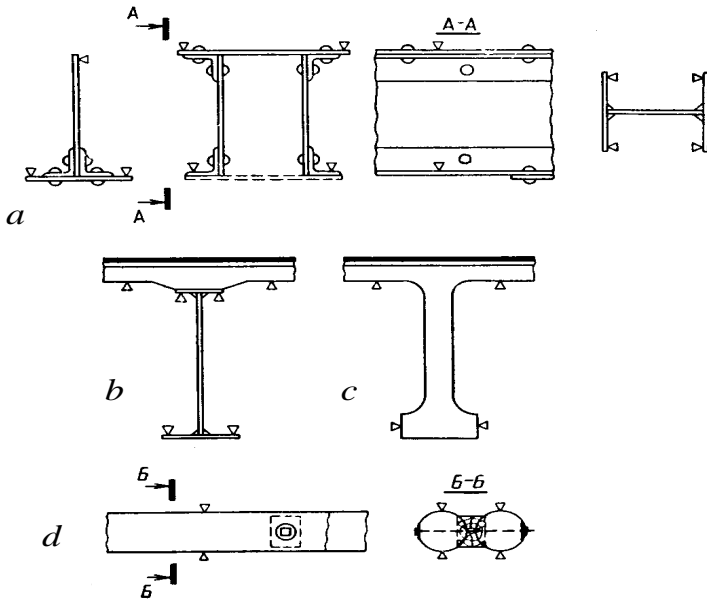


Рис. 10.7. Установка тензометрів і тензорезисторів на елементах прогонових будов мостів: а – металевих фермах, б – сталезалізобетонних балках; с – залізобетонних балках; d – дерев'яних балках

У металевих балках із суцільною стінкою кріплять не менше двох тензометрів на кожному поясі, а в балках, об'єднаних із залізобетонною плитою, додатково ставлять тензометри на плиту біля металу (але не на вути), а також на деякій відстані від балок з метою виявлення ступеня сумісності їх роботи (рис. 10.7, б).

У залізобетонних балках тензометри ставлять в розтягнутій та стиснутій зонах на бетон (рис. 10.7, с). В балках зі звичайною арматурою в розтягнутій зоні їх краще прикріпити до арматури, попередньо видаливши на невеликій ділянці захисний шар. Це підвищує точність вимірювання, але створює дефекти на балці.

У дерев'яних конструкціях мостів тензометри розташовують симетрично відносно головних осей поперечного перерізу елементів (рис. 10.7, d), уникаючи тріщин, сучків та інших утворень, які порушують однорідність деревини.

Давачі акустичної емісії до металевих конструкцій прикріплюють струбцинами або спеціальними магнітами. В бетоні залізобетонних конструкцій свердять отвори, в які вставляють хвилеводи.

Як правило, для зняття відліків з механічних приладів призначається ланка з двох чоловік: спостерігач знімає покази приладів і диктує працівникові, який записує їх в журнал. Це прискорює процес роботи і зменшує імовірність помилок. Для зв'язку між учасниками випробувань бажано мати радіотелефони.

Спочатку зупиняють рух по мосту і записують так звані нульові відліки за приладами – без тимчасового навантаження. Потім починається поступове і послідовне завантаження моста згідно з розробленими схемами. На кожному етапі після установки навантаження дається витримка 15...20 хв для того, щоб пройшли всі деформації; приріст деформацій, що спостерігається за 5 хв. не повинен перевищувати 5%. Після завантаження і звільнення моста від навантаження знімають кінцевий нульовий відлік, щоб перевірити, чи немає залишкових деформацій, або зафіксувати їх.

Під час завантаження на кожному ступені уважно оглядають основні несучі конструкції, щоб виявити зміни їх стану і зафіксувати тріщини, заміряють ширину розкриття тріщин.

Під час випробувань контролюють роботу конструкцій за основними параметрами отримуваної інформації. Якщо прирости деформацій і прогинів збільшуються за лінійним законом, з різким їх ростом необхідно зупинити випробування, розвантажити споруду і вияснити причину.

### **10.3. Динамічні випробування мостів**

Метою проведення динамічних випробувань мостів є:

- визначення величин динамічної дії, що створюється реальними рухомими навантаженнями;
- встановлення основних динамічних характеристик споруди – частот і форм власних коливань, динамічної коректності, характеристики затухань коливань.

Для визначення величин динамічної дії використовують важке навантаження, яке може реально рухатись по мосту і за нерівностей залізничного шляху чи проїзної частини викликати в конструкціях коливання й ударні дії.

Для дослідження динамічних характеристик мостів використовують: динамічне навантаження, яке діє на міст під час його експлуатації; вібраційне навантаження (вібродинамічні випробування); удар (ударні випробування).

На динамічні впливи інтенсивніше реагують прогонові будови, а опори, особливо масивні, слабо. Тому таким випробуванням підда-

ють тільки прогонові будови, і лише в особливих випадках – опори.

У прогонових будовах мостів від дії динамічних випробувань виникають вертикальні і горизонтальні навантаження. В автодорожніх мостах в більшості випадків достатньо вивчити вертикальні коливання, тому що горизонтальні є значно слабшими. І лише для окремих видів конструкцій мостів –исячі або з невеликою горизонтальною жорсткістю – слід досліджувати горизонтальні коливання. Для залізничних мостів досліджують вертикальні коливання.

Щоб вивчити коливання внаслідок рухомого навантаження, завантажені баластом автомобілі пропускають по мосту з різною швидкістю, починаючи з 5...10 км/год. Використовують як одну машину, так і колону автомобілів з різними інтервалами між ними. Один автомобіль пропускають по накатаній смузі руху (рис. 10.8, а). Для визначення максимальних статичних прогинів спочатку випробовують прогонову будову, ставлячи один автомобіль або колону в найневигідніше (для створення максимального прогину балок) положення і заміряють статичний прогин.



*a*



*b*

Рис. 10.8. Динамічні випробування прогонових будов мостів:  
*a* – проїзд автомобіля по накатаній смузі руху; *b* – через поріжок

Для збільшення динамічної дії на міст та моделювання можливих нерівностей покриття проїзної частини автомобіль пропускають через поріжок – дошку товщиною 5...8 см (рис. 10.8, *b*), яка покладена поперек руху в найбільш невідгідне положення (для розрізної балкової прогонової будови – посередині прольоту). Через поріжок автомобіль пропускають, як правило, з тими ж швидкостями, що і по покриттю нормальної рівності. Збільшити динамічний вплив можна, використовуючи двовісний автомобіль і поклавши кілька дошок (рекомендується п'ять) на взаємній відстані, рівній базі автомобіля, щоб передня і задня вісь одночасно створювали кілька разів удари по прогоновій будові і цим викликали інтенсивніше його коливання.

Горизонтальну поперечну дію на прогонову будову моста створюють різким відхиленням автомобіля, що рухається, від прямолінійного руху (рис. 10.9) або різким поворотом гусеничного транспорту на мосту.

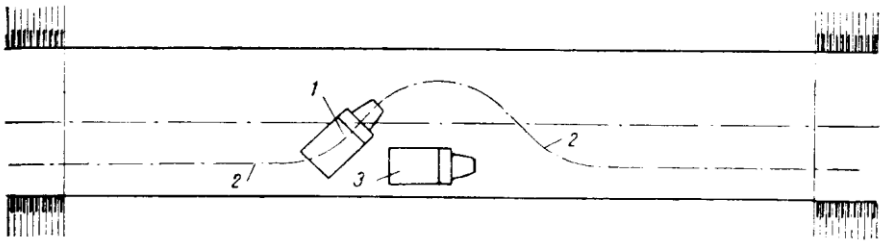


Рис. 10.9. Горизонтальна дія на міст автомобілем під час динамічних випробувань: 1 – автомобіль, що рухається; 2 – траєкторія його руху; 3 – автомобіль, що стоїть

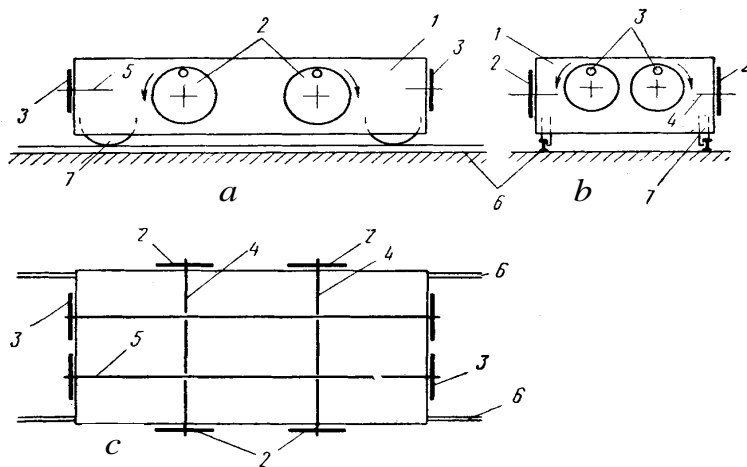
Пішохідні мости випробовують колоною людей, яка йде ритмічно прогоною будовою (в ногу), або неорганізовано – натовпом.

Вібродинамічні випробування проводять переважно на залізничних мостах. Для цього застосовують вібромашини. Принцип їх роботи базується на використанні інерційних сил мас, що ексцентрично обертаються: центробіжні сили, які виникають під час обертання мас, діють на прогонову будову з періодами, які залежать від швидкості обертання мас машини. Це дозволяє досліджувати реальну витривалість споруди, створюючи динамічні дії, близькі до резонансної і т.ін.

На рис. 10.10 зображено вібраційну машину з вісьмома неврівноваженими масами. Корпус 1 – це масивна вагонетка. На кінцях двох пар паралельних валів 4 і 5 насаджені диски 2 і 3 із закріпленими на них неврівноваженими масами. Вали обертаються мотором з частотою, яка регулюється. Вібраційна машина з допомогою спеціальних захватів прикріплюється до рейок для забезпечення жорсткого зв'язку з досліджуваною конструкцією.

Залежно від взаємного положення неврівноважених мас, є можливість отримувати такі силові дії:

- вертикальні збурювальні сили;
- горизонтальні збурювальні сили, направлені вздовж чи впоперек поздовжньої осі моста;
- пари сил, що діють у вертикальній площині, яка проходить через поздовжню вісь моста чи перпендикулярно до неї;
- пари сил, які діють у горизонтальній площині (на рівні розташування осей валів вібромашин).



*Рис. 10.10.* Вібраційна машина із вісьмома ексцентриками для випробування прогонових будов мостів: *a* – вид збоку; *b* – вид з торця; *c* – горизонтальна проекція: 1 – корпус машини; 2 і 3 – диски з ексцентриками; 4 – поперечні вали; 5 – поздовжні вали; 6 – рейкова основа; 7 – колеса візочка (електродвигун умовно не позначений)

При такому розташуванні вантажів, як показано на *рис. 10.10*, вібромашина створює вертикальні сили. *Рис. 10.11, а* ілюструє положення ексцентриків, яке необхідне для створення змінних горизонтальних зусиль, направлених впоперек поздовжньої осі моста. Для цього ексцентрики 1', 2', 4 і 4' у вихідному положенні повинні бути повернуті на  $180^\circ$  відносно ексцентриків 1, 2, 3 і 3'. На *рис. 10.11, b* зображено відповідні центробіжні зусилля, які виникають під час роботи машини в момент повороту всіх вантажів на кут порівнянно з їх положенням на *рис. 10.11, а*.

Випробування ударом дає найбільш чіткі діаграми власних коливань прогонових будов. Таке навантаження створюють, скидаючи на проїзну частину моста з висоти 0,5...2,0 м вантаж у вигляді чавунних або сталевих виробів, бетонних блоків, залізобетонних плит, обрізків палів вагою від 300 до 2000 кгс. Вантажі попередньо зважують або детально обміряють. Випробувальний вантаж скидають, піднімаючи його краном, копром чи іншими засобами. Щоб власні коливання крана не накладалися на коливання прогонової будови, його, якщо це можливо, ставлять поза межами прольоту, що випробовується, або на проїзну частину жорстко (на аутригери).

Під час випробування конструкції ударом слід прийняти заходи, які збережуть конструкцію моста від місцевих пошкоджень – піщані подушки, розподільчий настил.

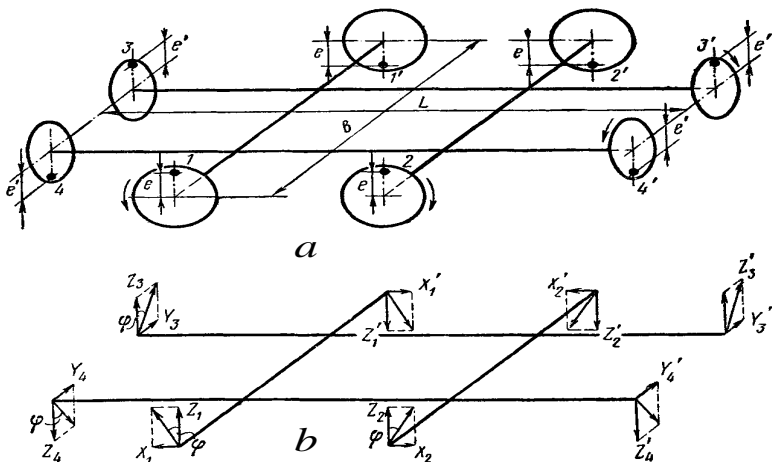


Рис. 10.11. Вібраційна машина із вісьмома дисками, з ексцентриками, встановленими для збурення горизонтальних поперечних коливань: *a* – розташування неврівноважених мас; *b* – збурювальні зусилля в момент повороту дисків на кут  $\varphi$ ; 1-4 і 1'-4' – неврівноважені маси (ексцентрики); *Z* – вертикальні складові центробіжних сил; *X* – горизонтальні складові, паралельні поздовжній осі вібратора; *Y* – горизонтальні складові, нормальні до поздовжньої його осі

Місце для створення ударних навантажень вибирають так, щоб в конструкції виникали найбільші прогини: всередині прольоту, на кінці консолі і т.ін. Вантаж скидають кілька разів, поступово збільшуючи висоту.

Під час динамічних випробувань для запису діаграм коливань або безпосереднього визначення динамічних характеристик конструкцій моста використовують прилади, описані в розділі 2. Вимушені коливання прогонових будов записують під час таких навантажень, за якими визначають динамічні коефіцієнти при різних швидкостях і умовах (з поріжком і без нього) руху. Власні коливання прогонової будови визначають після з'їзджання рухомого навантаження з прольоту або з використанням ударних навантажень.

#### 10.4. Обробка й аналіз результатів обстеження та випробування мостів

У результаті обстеження складають обмірні креслення моста, які порівнюють з проектними; за наявності відхилень виявляють їх причину й аналізують вплив на несучу здатність конструкцій. За даними неруйнівного контролю або лабораторних досліджень зразків конструкцій моста, визначають механічні характеристики матеріалів, які використовують у перерахунках існуючого моста [124, 125].



Поздовжні профілі моста, поперечники опор і проїзної частини креслять за результатами інструментальної зйомки. Це дає змогу виявити можливі осадки і крени опор та провисання балок. Важливо мати дані попередніх інструментальних зйомок. Це дозволить виявити динаміку протікання цих процесів і встановити, чи є невідповідність проектному рішенню дефектів будівництва, чи ці осадки і крени, які виникли під час експлуатації.

Креслять поперечні перерізи і розгортки прогонових будов і опор, на яких умовно позначають виявлені дефекти і пошкодження, їх розміри і розташування.

Складається відомість дефектів згідно з нижче наведеним зразком (табл. 10.1).

Таблиця 10.1

Відомість дефектів

№ п/п	Найменування дефектів	Місце розташування дефектів	Заходи з усунення дефектів	Терміни виконання	Відмітка про виконання

У відомості дефекти групують за елементами мостової споруди (опори, прогонова будова і т.ін.). Їх необхідно оцінити за впливом:

- на довговічність (тобто небезпеки зниження несучої здатності в процесі експлуатації в результаті несприятливого впливу середовища);
- на експлуатаційні якості споруди і безпеку руху транспорту і пішоходів.

Дефекти і пошкодження, залежно від матеріалу конструкцій моста, оцінюють відповідно до рекомендацій, викладених у ДБН В.2.3-6-2002. Так, для сталевих конструкцій тріщини у зварних елементах створюють потенційну небезпеку крихкого руйнування всього перерізу конструкції, яка особливо зростає за від’ємних температур повітря. Тріщини в ненапружених залізобетонних конструкціях, які містяться поперек робочої арматури з шириною розкриття більше 0,5 мм при арматурі періодичного профілю і більше 0,7 мм при гладкій, можуть свідчити про текучість в арматурі чи про втрату її зчеплення з бетоном.

За наявності суттєвих дефектів і пошкоджень необхідно дати рекомендації для їх усунення та вжити заходів для запобігання їх розвитку. Маючи результат обстеження, можна скласти паспорт моста згідно з формою, наведеною в інструкції.

Виходячи з показів приладів під час статичних випробувань мостів, вираховують заміряні деформації і напруження, аналізують

їх і порівнюють з теоретичними, визначеними для кожного положення випробувального навантаження.

При визначенні деформацій чи напружень у конструкціях мостів необхідно враховувати можливі залишкові деформації (напруження). Так, величина повного прогину  $f_n$  конструктивно складається із величин пружного  $f_{np}$  і залишкового  $f_3$  прогинів. Для їх визначення необхідно мати не менше трьох відліків на приладах: перший відлік  $B_1$  – до прикладення навантаження, другий  $B_2$  – після навантаження і третій  $B_3$  – після зняття навантаження. Тоді можна встановити:

$$\text{повний прогин} \quad f_n = B_2 - B_1, \quad (10.1)$$

$$\text{пружний прогин} \quad f_{np} = B_2 - B_3, \quad (10.2)$$

$$\text{залишковий прогин} \quad f_3 = B_3 - B_1. \quad (10.3)$$

Аналогічно визначають деформації (напруження), використовуючи  $\beta$  – перехідний коефіцієнт від показів приладу до величин деформацій (напружень), наприклад: повна деформація  $\varepsilon_n = (B_2 - B_1) \cdot \beta$ .

Зауважимо, що ці формули справедливі для металевих конструкцій під час їх роботи в межах пружності. На деформації конструкцій із інших матеріалів (залізобетону, дерева) значно впливає тривалість навантаження, температура і вологість зовнішнього середовища. Тому після двох випробувань одного й того ж прольоту моста однаковим навантаженням, але з різною тривалістю, можна отримувати різні величини повного і залишкового прогинів.

Як правило, залишкові прогини великі у новозбудованих мостах. Під максимальним випробувальним навантаженням в дерев'яних мостах залишкові прогини можуть становити до 40%, в залізобетонних – до 10%. В мостах, що експлуатуються, при задовільному стані конструкцій вони близькі до нуля.

У практиці випробувань мостів при достатній жорсткості опорних частин, масивних опорах, надійній основі допускається не заміряти осадки опор, оскільки ця величина на порядок менша від прогинів. Але в інших випадках (гумово-металеві опорні частини, рамно-консольні опори і ін.) необхідно це робити.

*Рис. 10.12* ілюструє два можливі випадки встановлення прогиномірів на балці з врахуванням осадки опор: при доступності опорних перерізів балки (*рис. 10.12, а*) і при крайніх прогиномірах, зсунутих вздовж прольоту.

При улаштуванні приладів над опорами і посередині прольоту величину прогину  $f$  легко отримати зі співвідношення

$$f = y_2 - \frac{y_1 + y_3}{2}, \quad (10.4)$$

де:  $y_1$  і  $y_3$  – осадки в опорних перерізах;  $y_2$  – вертикальне переміщення середнього перерізу.

Коли неможливо безпосередньо заміряти осадки, визначають переміщення точок балки біля опор (рис. 10.12, б).

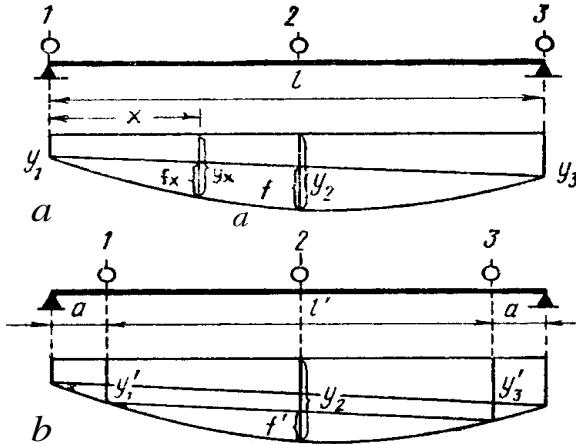


Рис. 10.12. Розташування приладів під час замірювання прогинів з урахуванням осадки опор:  $a$  – за доступності опорних перерізів балки;  $b$  – коли крайні прогиноміри зсунуті вздовж прольоту;  $l$  – проліт балки;  $l'$  – відстань між зсунутими прогиномірами;  $f$  – прогин середнього перерізу з врахуванням зсідання опор;  $f'$  – часткове зміщення середнього прольоту, зафіксоване при зсунутих крайніх прогиномірах

Якщо приймати ці переміщення за осадку опор, то отримуємо прогин, менший від величини дійсного прогину  $f$  :

$$f' = y_2 - \frac{y'_1 + y'_3}{2}, \quad (10.5)$$

де:  $f'$  – частина прогину середнього перерізу відносно віддалі  $l'$  між зсунутими відносно опор прогиномірами;  $y'_1$  і  $y'_3$  – вертикальні переміщення прогиномірів, зсунутих відносно опор.

Користуючись відомими із опору матеріалів залежностями з урахуванням обрису пружної лінії зігнутої балки, величину прогину балки можна вираховувати за формулою:

$$f = kf' . \quad (10.6)$$

Значення коефіцієнта  $k$  залежить від місця заміру прогинів біля опор і виду завантаження. Наприклад, при  $a = x$  і за рівномірно розподіленого навантаження  $q$  по всьому прольоту однопрогонової балки на шарнірних опорах коефіцієнт  $k$  знаходять за відношенням прогинів:

$$k = \frac{f}{f'} = \frac{5}{5 - 16\left(\frac{x}{l}\right) + 32\left(\frac{x}{l}\right)^3 - 16\left(\frac{x}{l}\right)^4}. \quad (10.7)$$

Аналогічно можна отримати значення  $k$  для інших видів завантаження, а також тоді, коли прогиноміри встановлені на різних відстанях від опор.

На практиці трапляються випадки, коли неможливо заміряти найбільшу величину прогину  $f_{\max}$ .

Тоді за значенням прогину  $f_x$  в перерізі, розташованому на відстані  $x$  від опори (рис. 10.12, а), можна знайти:

$$f_{\max} = k_x f_x. \quad (10.8)$$

Коефіцієнт  $k_x$  у даному випадку залежить від статичної схеми конструкції, виду навантаження і величини  $x$ . Наприклад, для однопрогонової статично визначеної балки з рівномірно розподіленим по всьому прогону навантаженням значення цього коефіцієнта:

$$k_x = \frac{1}{3,2 \left[ \frac{x}{l} - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]}. \quad (10.9)$$

За наявності осадки опор, рівних  $y_1$  і  $y_3$ , величину прогину  $f_x$  визначають за формулою

$$f_x = y_x - y_1 \left( \frac{l - x}{l} \right) - y_3 \left( \frac{x}{l} \right). \quad (10.10)$$

Для аналізу і наглядності отриманих результатів величини прогинів подають графічно у вигляді епюр і графіків. На рис. 10.13. подано результати випробувань прогонової будови моста до і після поширення накладною плитою [87, 88, 127, 128].

Існуючий балковий міст випробувано завантаженими автомобілями. Епюра 1 побудована за прогинами балок посередині прольоту моста і схемі завантаження 1. Після поширення моста накладною плитою з консолями були проведені повторні статичні випробування. Ще раз встановили автомобілі на прогонової будові (схема завантаження 2) і отримали епюру прогинів балок 2. Автомобілі встановлені в крайнє положення на консолі накладної плити за схе-

мою 3 і отримана епюра прогинів балок 3. Як бачимо, після поширення накладною плитою завдяки включення її в сумісну роботу з балками прогини останніх суттєво зменшились, що свідчить про збільшення жорсткості прогонової будови.

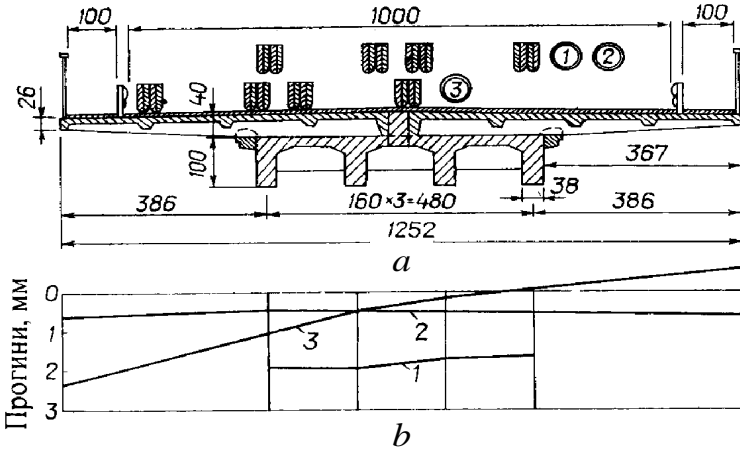


Рис. 10.13. Поперечний переріз поширеної накладною плитою прогонової будови моста і схеми завантаження (а); епюри прогинів балок (b): 1 – до поширення моста; 2, 3 – після поширення моста

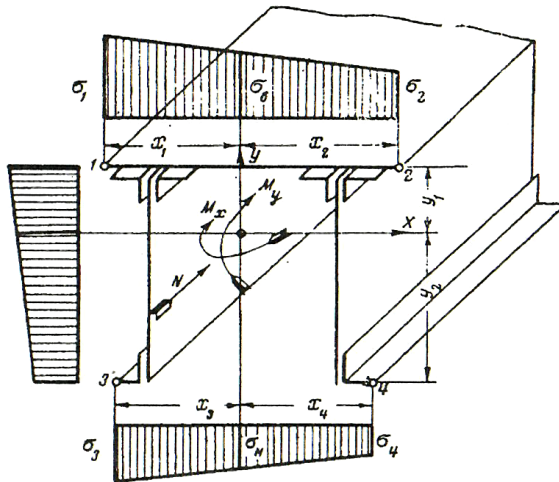


Рис. 10.14. Схема напруженого стану перерізу при дії згинальних моментів  $M_x$ ,  $M_y$  і нормальної сили  $N$

За заміряними відносними деформаціями знаходять напруження в елементах конструкції  $\sigma = \epsilon E$ . Напруження по перерізу, навіть в елементах, які піддаються центральному стиску чи розтягу,

розподіляються нерівномірно. Якщо ця нерівномірність значна, то це свідчить про порушення роботи конструкції. Тоді аналізом необхідно виявити причини.

Розглянемо переріз, в якому під час випробувань заміряні фіброві деформації в точках 1–4 (рис. 10.14). Знаючи геометричні характеристики поперечного перерізу і модуль пружності  $E$ , визначають напруження

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 E = \sigma_1 = \frac{N}{F} + \frac{M_y y_1}{J_x} + \frac{M_x x_1}{J_y}; \\ \varepsilon_2 E = \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M_y y_1}{J_x} - \frac{M_x x_2}{J_y}; \\ \varepsilon_3 E = \sigma_3 = \frac{N}{F} - \frac{M_y y_2}{J_x} + \frac{M_x x_3}{J_y}; \\ \varepsilon_4 E = \sigma_4 = \frac{N}{F} - \frac{M_y y_2}{J_x} - \frac{M_x x_4}{J_y}. \end{array} \right. \quad (10.11)$$

Осьові напруження знаходять за формулами:

$$\sigma_e = \sigma_1 + \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{x_1 + x_2} x_1, \quad \sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{x_3 + x_4} x_3. \quad (10.12)$$

Нормальну силу  $N$  та згинальні моменти  $M_x$  і  $M_y$ , які діють на поперечний переріз, можна визначити, використовуючи три рівняння із чотирьох (10.11). За чотирма рівняннями можна перевірити точність випробувань. Для цього одне і те ж зусилля визначають із двох груп різних рівнянь. Розв'язуючи перші три, отримаємо:

$$\begin{aligned} M_{x1} &= (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{J_y}{x_1 + x_2}; \\ M_{y1} &= \left[ (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{x_2 + x_3}{x_1 + x_2} + (\sigma_2 - \sigma_3) \right] \frac{J_x}{y_1 + y_2} = \\ &= \left( \sigma_1 \frac{x_2 + x_3}{x_1 + x_2} + \sigma_2 \frac{x_1 - x_3}{x_1 + x_2} - \sigma_3 \right) \frac{J_x}{y_1 + y_2}; \\ N_1 &= \left[ (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{x_2 y_2 - x_3 y_1}{(x_1 + x_2)(y_1 + y_2)} + (\sigma_2 - \sigma_3) \frac{y_2}{y_1 + y_2} + \sigma_3 \right]; \\ F &= \left[ \sigma_1 \frac{x_2 y_2 - x_3 y_1}{(x_1 + x_2)(y_1 + y_2)} + \sigma_2 \frac{x_1 y_2 - x_3 y_1}{(x_1 + x_2)(y_1 + y_2)} + \sigma_3 \frac{y_1}{y_1 + y_2} \right]. \end{aligned} \quad (10.13)$$

Розв'язуючи рівняння, маємо:

$$\begin{aligned}
 M_{x2} &= (\sigma_3 - \sigma_4) \frac{J_y}{x_3 + x_4}; \\
 M_{y2} &= \left[ (\sigma_2 - \sigma_3) + (\sigma_3 - \sigma_4) \frac{x_2 + x_3}{x_3 + x_4} \right] \frac{J_x}{y_1 + y_2}; \\
 N_2 &= \left[ (\sigma_2 - \sigma_3) \frac{y_2}{y_1 + y_2} + (\sigma_3 - \sigma_4) \frac{x_4 + \frac{x_2 + x_3}{y_1 + y_2} y_2}{x_3 + x_4} + \sigma_4 \right] F.
 \end{aligned} \tag{10.14}$$

Велика розбіжність у величинах  $M_{x1}$  і  $M_{x2}$ ,  $M_{y1}$  і  $M_{y2}$ ,  $N_1$  і  $N_2$  може свідчити про значні похибки приладів або про невраховані фактори (крутний момент, концентрацію напружень, ін.).

Деформацію і напруження, отримані експериментально, порівнюють з теоретичними, які вираховують за величинами випробувальних навантажень та точних місцях їх установки на мосту. Важливо під час складання розрахункових схем враховувати всі можливі впливи на розподіл навантажень і роботу конструкції (дефекти, пошкодження, включення в роботу плити проїзної частини шарів покриття тощо). Розрахунки бажано виконувати як “точними” методами з допомогою сучасних програмних комплексів, так і традиційними: із завантаженням ліній впливу, знаходженням коефіцієнтів поперечної установки тощо.

Основним критерієм позитивної оцінки роботи конструкцій мостів за результатами випробувань вважається відповідність пружних факторів (зусиль, напружень, деформацій, прогинів), заміряних у конструкції під навантаженням, значенням, знайденим розрахунковим шляхом.

Показником роботи конструкції під час статичних випробувань є конструктивний коефіцієнт  $K$ :

$$K = \frac{S_e}{S_{cal}}, \tag{10.15}$$

де:  $S_e$  – фактор, заміряний під навантаженням;  $S_{cal}$  – той же фактор, знайдений від випробувального навантаження розрахунковим шляхом.

Для загальної оцінки роботи моста визначають значення коефіцієнта  $K$  під найбільшим випробувальним навантаженням для таких факторів:

- середніх (за шириною) прогинів прогонових будов;
- середніх осьових напружень у розтягнутих чи стиснутих елементах;

– середніх фібрових напруженнях у кожній із зон (розтягнутій чи стиснутій) згинальних елементів.

Конструкцію моста вважають задовільною, якщо конструктивний коефіцієнт  $K$  менший одиниці. Як правило, за даними чисельних статичних випробувань значення коефіцієнта  $K$  для основних несучих конструкцій становить  $0,7 \dots 1,0$  і навіть нижче.

Для врахування реальної просторової роботи конструкції моста рекомендується визначати фактичний коефіцієнт поперечного розподілу тимчасового навантаження:

$$K_{npi} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}, \quad (10.16)$$

де:  $K_{npi}$  – фактичний коефіцієнт поперечного розподілу для  $i$ -ї балки (ферми, арки);  $f_i$  – величина пружного прогину  $i$ -ї балки, заміряна під час випробувань;  $n$  – кількість балок чи інших точок у поперечному перерізі прогонової будови.

Знайдені фактичні коефіцієнти поперечного розподілу  $K_{npi}$  порівнюють з їх значеннями, прийнятими при проектуванні.

Одним із критеріїв оцінки моста за результатами статичних випробувань може служити співвідношення замірених пружних і залишкових деформацій, яке виражається показником роботи конструкції  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{f_r}{f_{el}}, \quad (10.17)$$

де:  $f_r$  – величина залишкового прогину, визначеного після стабілізації деформацій;  $f_{el}$  – величина пружного прогину, визначеного за тих самих умов.

Роботу новозбудованих мостів за співвідношенням пружних і залишкових деформацій необхідно оцінювати, керуючись результатами першого завантаження конструкцій випробувальним навантаженням, близьким до нормативного.

Показники роботи конструкцій  $\alpha$  можуть досягати таких значень [14] для новозбудованих мостів:

- виконаних з дерева –  $0,30$ ;
  - виконаних з інших матеріалів –  $0,15$ ;
- для мостів, які знаходяться в експлуатації:
- виконаних з дерева –  $0,10$ ;
  - виконаних з інших матеріалів –  $0,05$ .

Результати динамічних випробувань мостів отримують у вигляді прогинограм, осцилограм, віброграм або величин амплітуд, частот та інших параметрів – залежно від того, які використовувались прилади. Для прогинограм, осцилограм і віброграм необхідна обробка результатів.



Чітке уявлення про процеси коливання конструкцій дають прогинограми (рис. 10.15).

Вплив рухомого навантаження на прогонову будову характеризує динамічний коефіцієнт, який визначають як відношення найбільшого значення ординати прогинограми до значення ординати під час статичного навантаження:

$$1 + \mu = \frac{f_{\partial}}{f_c}. \quad (10.18)$$

За осцилограмами немає можливості визначити статичний прогин. Тому необхідно автомобіль, який використовують для динамічних випробувань, встановити на смугу руху на прогоновій будові в найбільш невідгідне положення і заміряти статичний прогин. За осцилограмою знаходять максимальну амплітуду  $A$ , тоді динамічний коефіцієнт:

$$1 + \mu = \frac{f_c + A/2}{f_c}; \quad (10.19)$$

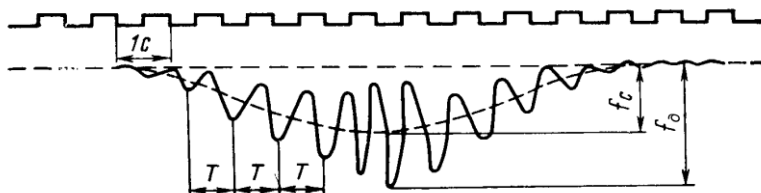


Рис. 10.15. Прогинограма коливань розрізної прогонової будови:

$f_{\partial}$  – найбільший динамічний прогин на віброграмі;  $f_c$  – максимальний статичний прогин;  $T$  – період коливань;  $1c$  – мітка часу (1 секунда)

Динамічні коефіцієнти визначають, пропускаючи навантаження як по рівній поверхні проїзної частини, так і через поріжок. Побудувавши криву залежності між швидкістю руху і динамічним коефіцієнтом, можна знайти критичну швидкість, яка відповідає найбільшому значенню динамічного коефіцієнта.

Від руху навантаження через міст виникають різного роду вимушені коливання (рис. 10.16). Прості гармонійні коливання (рис. 10.16, а) трапляються рідко. Складні отримують або внаслідок динамічного навантаження, яке створює періодичні імпульси різної частоти, або в результаті накладання вільних коливань конструкції з вимушеними простими чи складними.

За зовнішнім видом діаграми, точніше за характером зміни амплітуди, можна зробити деякі висновки про динамічні процеси у споруді.

ді. Так, віброграма з різкими змінами величини амплітуд (рис. 10.16, d) вказує на удари, які виникають в певні моменти дії динамічного навантаження на споруду (вибоїни і нерівності покриття, стики рейок). Явище резонансу (збіг періоду вільних коливань з періодом вимушених) характеризується швидким наростанням амплітуди коливань і стійким зберіганням великої амплітуди на значній довжині діаграми (рис. 10.16, f). Інколи виникає биття – наслідок накладання двох коливань з близькими, але не рівними періодами (рис. 10.16, g).

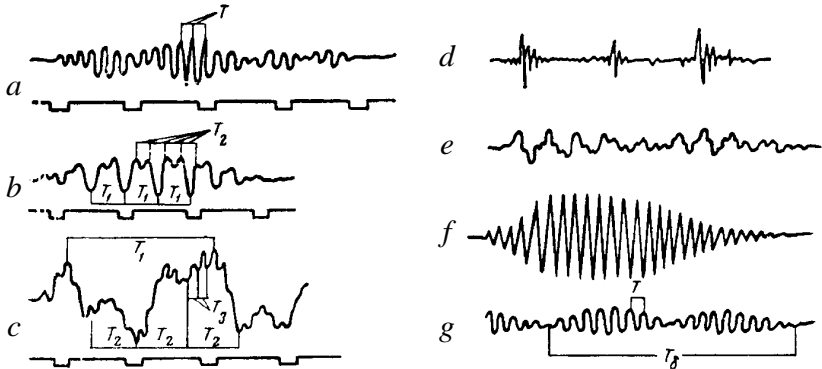


Рис. 10.16. Основні різновиди віброграм:

- a – просте коливання одного тону; b – складне двох тонів; c – складне трьох тонів; d – коливання від ударного навантаження; e – складне без різких ударів; f – резонанс; g – биття;  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – тони коливань

Період власних коливань і коефіцієнт зникання можна визначити на ділянці віброграми із записом коливань досліджуваної конструкції, які зникають. Запис загасання коливань прогонової будови можна виконати після з'їждження випробувального навантаження з прогонової будови.

Результати визначення динамічних характеристик прогонових будов мостів для аналізу доцільно подавати у вигляді графіків. Так, на рис. 10.17 наведено дані динамічних випробувань автодорожнього моста до і після поширення накладною плитою.

Період вільних коливань існуючої прогонової будови рівний 0,159 с, а після поширення і включення в роботу накладної плити він зменшився до 0,137 с.

Періоди й амплітуда вимушених коливань залежать від швидкості проїзду випробувального навантаження (автомобіля КраЗ вагою 238кН) та умов проїзду (рівне покриття чи поріжок – дошка 50 мм). Для існуючої прогонової будови в діапазоні швидкостей 20...40 км/год періоди вимушених і вільних коливань балок збігаються, вони коли-

ваються в резонансній зоні, про що свідчить збіг максимуму амплітуд коливань з точкою перетину ліній вільних і вимушених коливань. Зі збільшенням швидкості проїзду до 50...60 км/год періоди вимушених коливань стабілізуються, а амплітуди зменшуються.

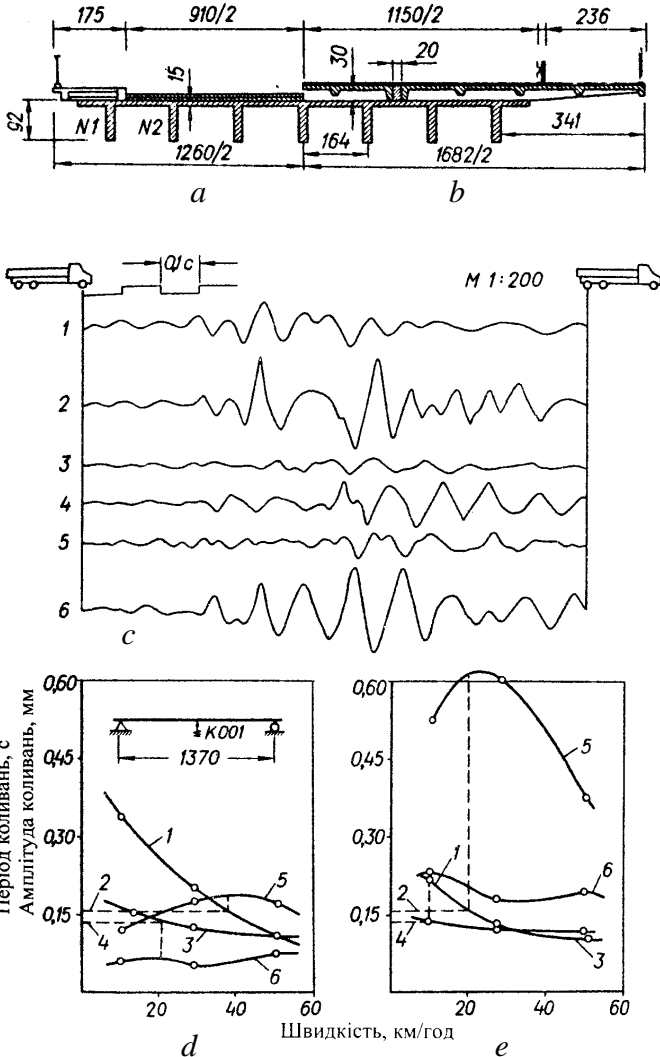


Рис. 10.17. Конструкція існуючої (а) і поширеної (б) прогонової будови моста та результати її динамічних випробувань; с – осцилограми коливань балки №2: 1 – до поширення по рівній проїзній частині і 2 – через поріжок; 3, 4 – те ж, після поширення; 5, 6 – те ж, для консолі; d, e – графіки періодів і амплітуд коливань при рівній проїзній частині і через поріжок: 1, 2 – періоди вимушених і власних коливань до поширення; 3, 4 – те ж, після поширення; 5, 6 – амплітуди вимушених коливань до і після поширення

З включенням у роботу накладної плити динамічні характеристики прогонової будови суттєво покращуються. Період вимушених коливань мало залежить від швидкості проїзду, а резонансні зони коливань виникають в діапазоні швидкостей 10... 20 км/год, які, як правило, не виникають під час руху транспорту мостом.

Отримані під час динамічних випробувань експериментальні динамічні характеристики порівнюють з розрахунковими, нормованими та проектними. Динамічним розрахунком прогонової будови визначають період вільних коливань конструкцій, які порівнюють з періодом, отриманим експериментально. Чим більші коефіцієнти і декременти загасання коливань, тим кращі динамічні характеристики моста.

Позитивною характеристикою моста є вищий проти вимушеного період власних коливань. Бажано, щоб він відрізнявся не менше ніж на 20%.

Динамічні коефіцієнти, отримані під час проїзду одного автомобіля, часто вищі, ніж нормовані. Це обумовлено тим, що їх визначають для колон автомобілів.

### **10.5. Суть методів моделювання й галузь їх використання**

У лабораторіях конструкції мостів досліджують переважно на моделях, рідше випробовують елементи мостових конструкцій. Залежно від мети дослідження моделі мостів виготовляють в малому масштабі (1:10 ... 1:100) з пружних матеріалів, або у великому (1:10 ... 1:4 і більше) із матеріалів, які відповідають реальним конструкціям мостів.

В природі не існує ідеально пружних матеріалів, що підкоряються закону Гука від початку навантаження до руйнування. Але в багатьох з них залежність між напруженнями і деформаціями близька до лінійної, тобто з певним наближенням їх можна вважати пружними. Саме такі матеріали і використовують для виготовлення пружних моделей мостів [127, 128, 222].

Під час моделювання найважливіше вибрати матеріал. Тут не можна порушувати правил моделювання, які диктує теорія подібності, забезпечити розв'язання задачі з мінімальними затратами засобів і часу.

Для моделювання схеми споруди, яку розраховують за правилами лінійної будівельної механіки, не обов'язково використовувати аналогічні матеріали. Наприклад, потрібно запроєктувати складну просторову стержневу залізобетонну конструкцію. На стадії технічного завдання відомі тільки її геометричні розміри. Для робочих

креслень потрібно мати розрахункові зусилля, за якими буде виконуватись армування і конструювання.

Для цього можна виготовити маломасштабну модель із пружного матеріалу і визначити розрахункові зусилля. І лише після встановлення всіх конструктивних параметрів (армування, перерізу бетону, конструкції вузлів і т. ін.) перевірити напружено-деформований стан конструкції аж до граничного на крупномасштабній моделі із аналогічного матеріалу – залізобетону.

Якість виготовлення моделей із пружних матеріалів значною мірою залежить від їх технологічності. Матеріал повинен легко оброблятися як на станках, так і ручним інструментом. Важливо, щоб він міг склеюватись чи зварюватись так, щоб стик був рівномірним без додаткових підсилювальних елементів.

Переважно маломасштабні моделі виготовляють із полімерних матеріалів – органічного скла, неолейкориту, або ж із епоксидної смоли E86 заливкою її в форми, а також із звичайних будівельних матеріалів - гіпсу, цементного розчину, бакелізованої фанери, алюмінію, сталі тощо.

Випробувальний стенд, як правило, виготовляється із сталю прокату із з'єднаннями на зварці чи болтах. Його жорсткість повинна в багато разів перевищувати жорсткість пружної моделі. Інакше напружений стан моделі під час випробувань не відповідатиме дійсному, а розрахункова схема відрізнятиметься від розрахункової схеми натурної споруди.

Під час випробування моделей необхідно враховувати, що їх власна вага невелика. Тому при її завантаженні тільки тимчасовим навантаженням може виникнути відрив частини моделі від опор, чого немає в натурній конструкції. Тоді слід або довантажити всю модель розподіленим навантаженням, або зробити конструкцію опирання такою, щоб зв'язок не був одностороннім.

Для завантаження бажано використовувати гравітаційні пристрої – зразкові гирі, протаровані вантажі. Навантаження може передаватись на модель безпосередньо (лежати на моделі чи підвішуватись до неї), а також через систему важелів, блоків, тяжів.

Моделі мостових конструкцій часто необхідно рухомо навантажувати для дослідної побудови ліній або поверхонь впливу. Суть експериментального визначення ліній впливу полягає у вимірюванні дослідного зусилля під час переміщення одиничного (постійної ваги) вантажу по моделі. Можна імітувати його переміщення послідовним підвішуванням до зароблених в моделі анкерів або завантаженням з переставлянням вантажу. Цей метод має недоліки, оскільки

ки модель зазнає дії багатократних циклів “завантаження-розвантаження” і запис ліній впливу є дискретним. Тому доцільно рухоме навантаження створювати за допомогою сталевого диска чи штанги з навішеними вантажами, які переміщуються по моделі з допомогою тонких мірних тяжів. Рух вантажу забезпечується синхронним електродвигуном із шківками, на які намотуються тяжі.

Наведемо приклад дослідження маломасштабної моделі моста, виконаного в лабораторії залізобетонних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури [127, 128, 193].

Проект шляхопроводу передбачав влаштування чотирипрольотної нерозрізної косої прогонової будови з прольотами  $28 + 2 \times 35 + 28$  м із збірних балок (рис. 10.18). Балки коробчатого перерізу об'єднуються між собою бетоном замоноличування, який створює ромбовидні шпонки.

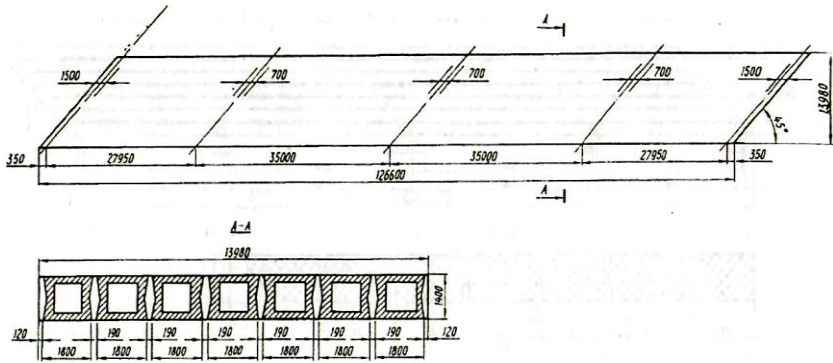


Рис. 10.18. План і поперечний розріз чотирипрольотного нерозрізного косої шляхопроводу.

Розрахувати нерозрізні косі в плані прогонові будови мостів досить складно. Для просторового розрахунку прогонової будови потрібно отримати поверхні впливу поздовжніх згинальних моментів у характерних перерізах, а також поверхню етану від дії одного рівномірно-розподіленого навантаження. Ці розрахункові дані отримано методом моделювання.

Оскільки довжина балок прогонової будови суттєво більша їх ширини і висоти, переважають поздовжні нормальні напруження. Це дало змогу використати для моделювання пружний матеріал з коефіцієнтом Пуассона, значення якого відрізняється від такого для залізобетону. Модель прогонової будови виготовлено із оргскла, яке має модуль пружності  $E = 3200$  МПа, границю міцності на розтяг  $\sigma = 102$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,32.

Із конструктивних і методологічних міркувань модель виконана в масштабі 1:78. Переріз балок – суцільний, прямокутний; подібність за жорсткістю створювали шляхом підбору приведеної жорсткості балок моделі.

Шарнірне з'єднання балок між собою забезпечували об'єднанням їх тонкою перемичкою із оргскла на рівні нейтральної осі. Надопорної ділянки моделі були монолітні, як і в натурній споруді (рис. 10.19).

Стенд для випробувань виконаний із сталевого прокату і забезпечував шарнірно-нерухоме опирання на крайні опори і проміжні стійки, як і в натурній споруді. Поверхні впливу згинальних моментів визначали переміщенням одиничного вантажу вздовж балок моделі прогонової будови і записували осцилограми фібрових деформацій у перерізах за показами тензорезисторів. Вантаж переміщали електродвигуном синхронно з протяжкою стрічки осцилографу, реєструючи напруження в семи точках моделі.

Поверхні впливу згинальних моментів визначені для 21 перерізу моделі прогонової будови. Ординати поверхонь впливу згинальних моментів від одиничного рівномірно-розподіленого навантаження знаходили, сумуючи ординати відповідних ліній впливу для кожного перерізу:

$$M_{n.c} = m_p \sum Y_{ij}, \quad 10.20$$

де:  $M_{n.c}$  – ордината поверхні стану;  $Y$  – ордината лінії впливу;  $i$  – порядковий номер балок прогонової будови;  $j$  – індекс ординати лінії впливу для кожної балки;  $m_p$  – множник подібності за навантаженням па модель.

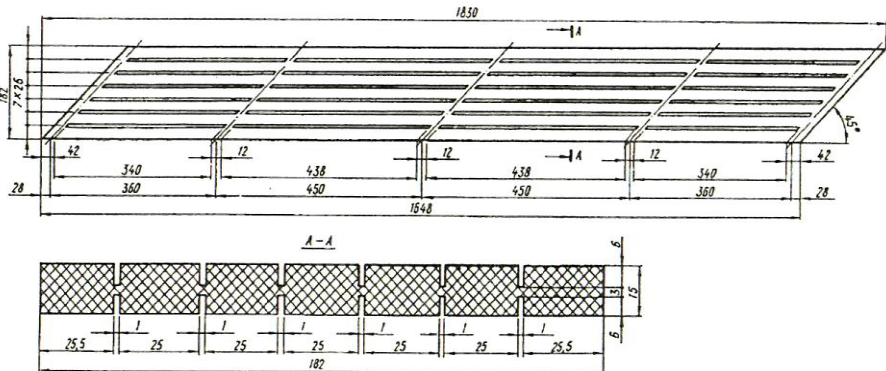


Рис. 10.19. Геометричні розміри і конструкція моделі прогонової будови

Така методика дала змогу обмежитися випробуванням моделі рухомим одиничним навантаженням. Необхідність дослідження моделі під рівномірно-розподіленим навантаженням відпала.

Перехід від зусиль, отриманих у моделі, до зусиль у натурній

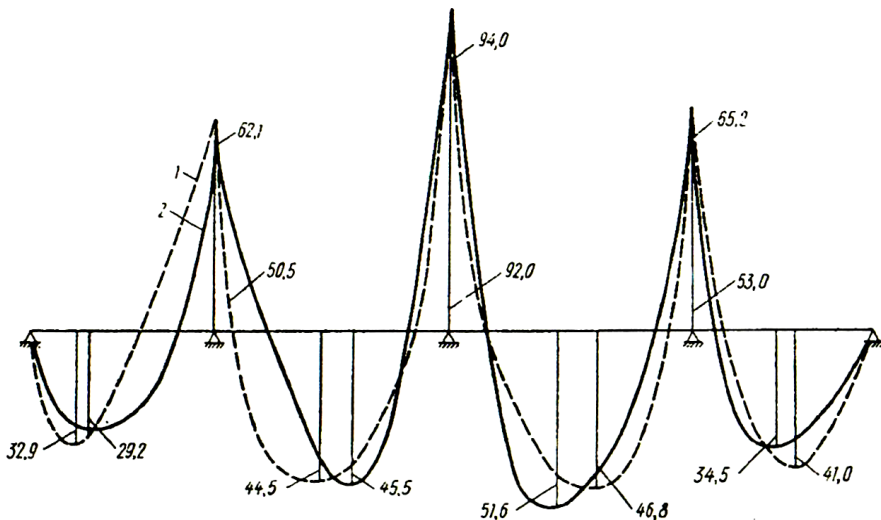
споруді здійснювали з допомогою масштабних множників, які підраховували за рівняннями зв'язку відповідно з теорією розширеної подібності:

$$M_M = m_p m_l M_M = m_p m_l \varepsilon_M W_M E_M, \quad 10.21$$

де:  $m_p = P_H / P_M$  – масштабний множник по навантаженню;  $P_H = 1000$  кГс;  $P_M = 5,8$  кГс;  $m_l = l_H / l_M$  – геометричний масштабний множник;  $\varepsilon_M$  – фіброві деформації в перерізі моделі;  $W_M$  – момент опору перерізу;  $E_M$  – модуль пружності матеріалу моделі (оргскла).

На *рис. 10.20* порівняно згинальні моменти, отримані моделюванням і за таблицями. Видно суттєве розходження їх величин, що пояснюється недосконалістю таблиць, які не враховують конструктивну ортотропність прогонової будови (різна жорсткість у поздовжньому і поперечному перерізах на прямих), а також кінцеві деформації конструкції.

За розрахунковими величинами згинальних моментів, визначених тимчасовим нормованим навантаженням експериментальних ліній впливу (отриманих методом моделювання), виконано конструювання й армування балок прогонової будови шляхопроводу на автодорозі Київ-Бориспіль. Шляхопровід пройшов натурні випробування й успішно експлуатується.



*Рис. 10.20.* Експериментальна та теоретична (за таблицями) епюри згинальних моментів у крайній балці шляхопроводу:  
1 – за таблицями; 2 – за даними випробувань моделі.

Крупномасштабні моделі виготовляють із того ж матеріалу, що і конструкцію. На них вивчають як роботу мостової споруди загалом, так і окремих її елементів та вузлів.



У Львівському політехнічному інституті досліджували більше 20-ти крупномасштабних моделей прогонових будов мостів із залізобетону [79]. Випробовували крупномасштабні моделі існуючих і поширених прогонових будов, а також окремі, об'єднані з накладною плитою, балки. Мета дослідження полягала в наступному:

- вивчити сумісну роботу елементів існуючих і поширених прогонових будов;
- дослідити характер розподілу тимчасового навантаження між існуючими і приставними балками залежно від співвідношення їх жорсткостей;
- вивчити особливості роботи прогонових будов, поширених накладною плитою.

Моделі прогонових будов і балок виготовляли прольотом 4,0м у масштабі 1:4 із дрібнозернистого бетону. Балки армувалися зварними каркасами та сітками, пустотні плити прогонових будов – попередньо напруженою арматурою. Із балок різної висоти і пустотілих плит формували різні типи прогонових будов: існуючих із елементами однакової жорсткості, поширених симетрично й односторонньо балками і плитами різної жорсткості, а також накладними залізобетонними плитами. Крім того, випробовували і моделі окремих балок.

Під час розробки методики досліджень ставилася задача отримати поверхні прогинів балок прогонових будов і опорні реакції моделей при різних положеннях зовнішнього зосередженого навантаження. Для цього виготовили дослідний стенд, який дозволяв створити зосереджене зусилля в будь-якій точці моделі (рис. 10.21).

Дослідні зразки під час випробувань встановлювали на інвентарні опори 3, зварені із металевого прокату і закріплені до силової підлоги 2. Завантажували зразки зосередженою силою домкратом через завантажувальний пристрій почергово в кожній точці перерізу поздовжніх і поперечних ребер. Зразковим динамометром ДОСМ-5 контролювали зусилля. В цих же точках по всій моделі індикаторами годинникового типу вимірювали прогини балок. Індикатори закріплювали в спеціальних затискачах на рамі із кутників, яку встановлювали знизу прогонової будови. Опирання головних балок здійснювалося через зразкові динамометри ДОСМ-3 для вимірювання опорних реакцій при кожному положенні тимчасового навантаження. Осадку опор вимірювали мікроіндикаторами. В процесі випробувань фіксували фіброві деформації бетону головних балок на рівні центра ваги робочої арматури і зверху плити вздовж і поперек прольоту.

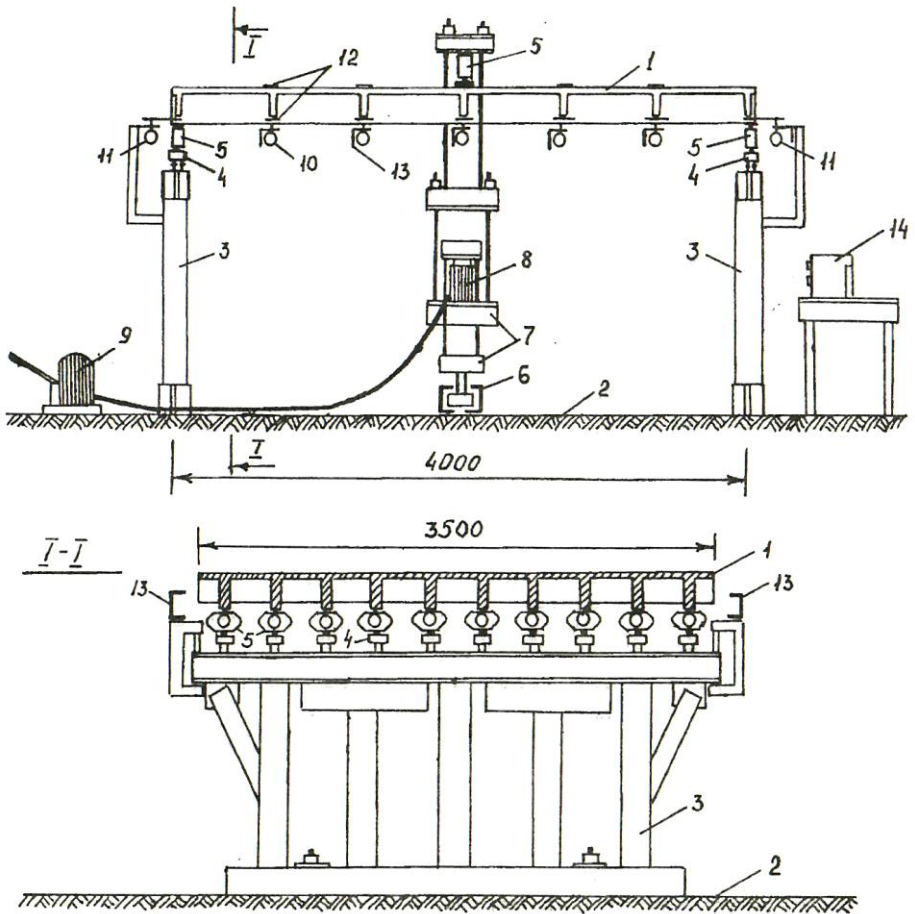


Рис. 10.21. Стенд для випробування крупномасштабних моделей прогонових будов мостів: 1 – модель; 2 – силова підлога; 3 – опори; 4 – регульовальні опорні частини; 5 – зразкові динамометри; 6 – силова траверса; 7 – система тяг; 8 – гідравлічний домкрат; 9 – насосна станція; 10 – індикатори; 11 – мікроіндикатори; 12 – тензорезистори; 13 – рама для кріплення індикаторів; 14 – автоматичний вимірвач деформацій.

Навантажували ступенями, рівними  $1/5 \dots 1/10$  від руйнівного, доводячи до нормативної величини, що відповідала ширині розкриття тріщин  $0,2 \dots 0,3$  мм. На кожному ступені витримували  $10 \dots 15$  хв, після чого знімали відліки приладів, спостерігали за тріщиноутворенням і мікроскопом вимірювали ширину розкриття тріщин.

Дослідження крупномасштабних моделей прогонових будов мостів показало, що вже за невеликих навантажень проявляється пружно-пластичний характер роботи матеріалу. Це необхідно враховувати у просторових розрахунках прогонових будов.

Отримані результати дали можливість розробити рекомендації з проектування поширення прогонових будов мостів і вибору ефективних варіантів поширення.

Для об'єднання збірної накладної плити з плитою прогонової будови мостів використовують шпонкові з'єднання із бетону і залізобетону. З метою вивчення роботи на зсув, несучої здатності, податливості і деформативності шпонкових з'єднань, а також розробки методики їх розрахунку і рекомендацій з конструювання в лабораторії Львівського політехнічного інституту досліджували дві серії зразків [87, 88]. В першій серії вивчали фрагменти натурних з'єднань, що відповідають реальному проекту реконструкції моста, а в другій – моделі шпонкових з'єднань у масштабі 1:2 (рис.10.22). Дослідні зразки відрізнялися розмірами, формою й армуванням шпонок, а також міцністю бетону замонолічування.

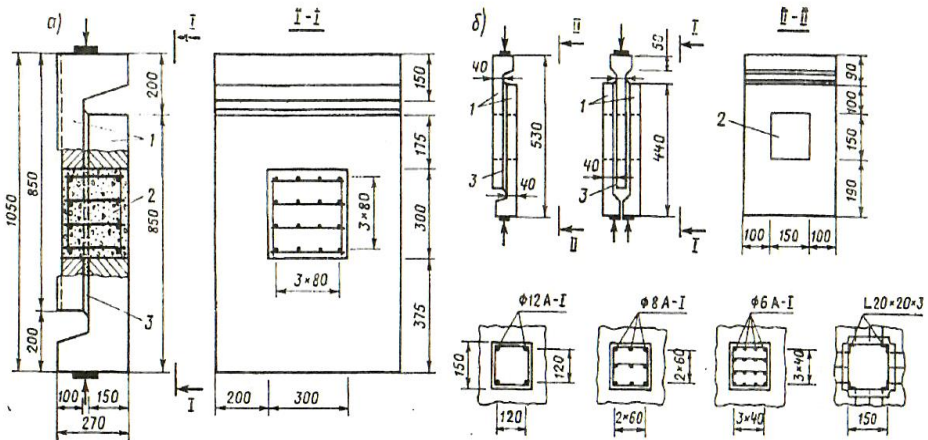


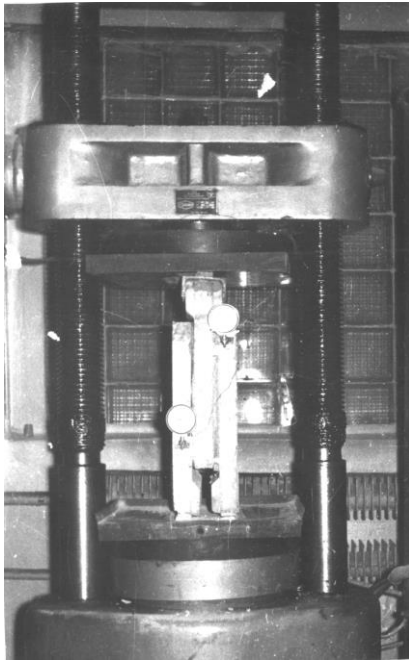
Рис. 10.22. Конструкція дослідних зразків-фрагментів шпонкових з'єднань плоских плит (а) і моделей шпонкових з'єднань (б):

1 – плити, що об'єднуються; 2 – шпонкове з'єднання; 3 – цементний розчин.

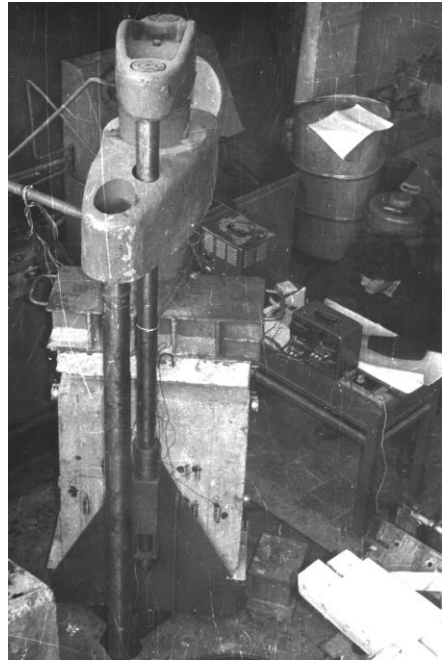
Випробовували на зосереджене зсувне навантаження, прикладене до Г- чи Т-подібних виступів плит через центруючі прокладки. Зразки завантажувалися ступінчасто зростаючим навантаженням до руйнування. Натурні зразки досліджували на пресі 2П-500, моделі шпонкових з'єднань – на пресі П-125 (рис.10.23, а). Під час випробування деформації зсуву плит по шву спряження заміряли мікроіндикаторами годинникового типу, деформації бетону замонолічування шпонок і бетону плит – тензорезисторами.

У мостах велике значення мають випробування на витривалість їх рекомендують проводити на натурних зразках. Тому на ви-

тривалість випробували натурні зразки шпонових з'єднань на пульсаторі МУП-50 (рис.10.23, б). Дослідні зразки витримали 2 млн. циклів завантаження.

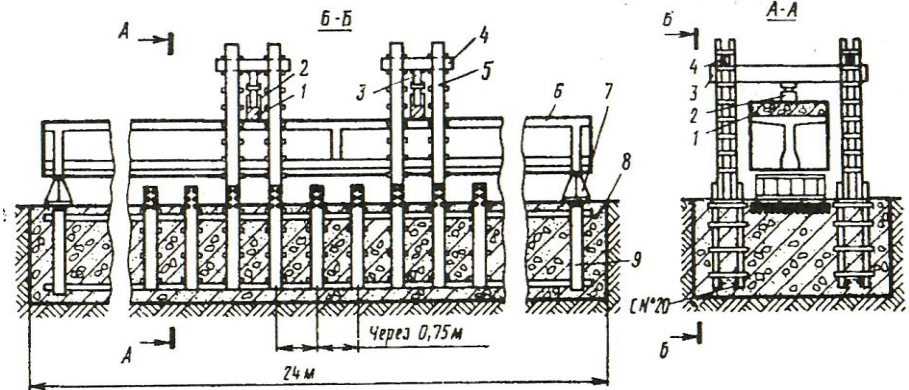


a



b

Рис. 10.23. Дослідження моделей шпонових з'єднань на зсув (а) і натурних фрагментів з'єднань на витривалість (б)



a

b

Рис. 10.24. Схема станда для випробувань мостових балок довжиною до 24м: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – гідравлічний домкрат; 3 – наддомкратна балка; 4 – упорна балочка; 5 – завантажувальні стійки; 6 – дослідна балка; 7 – опорна частина; 8 – фундамент станда; 9 – силові анкери.

Для випробування круномасштабних моделей та дослідження натурних балок мостів використовують стенди, які розміщують у лабораторіях або на відкритих площадках (рис.10.24). Вони універсальні і придатні для випробування моделей різних розмірів. Стенд складається із потужного бетонного фундаменту (силової підлоги), в яку забетоновані силові анкери, до яких болтами приєднують завантажувальні стійки (рис. 10.24, а, b). Дослідний зразок встановлюють на опорні частини і з допомогою системи балок завантажують гідравлічними домкратами.

## **10.6. Випробування мостів з руйнуванням конструкцій**

Лабораторні дослідження конструкцій мостів і випробування тимчасовим навантаженням мостів, що знаходяться в експлуатації, дають можливість отримати значний обсяг інформації про напружено-деформований стан мостових споруд, просторову роботу прогонових будов і т. ін. Але цього замало для повного аналізу і обґрунтованих висновків про несучу здатність мостів, особливо тих, які тривалий час були в експлуатації [127, 128, 222].

Просторова робота прогонових будов у стадіях, близьких до руйнування, суттєво змінюється внаслідок утворення пластичних шарнірів і перерозподілу зусиль між балками внаслідок тріщиноутворення і зміни їх жорсткості. Конструкції мостів, які перебували довго в експлуатації, мають дефекти, вплив зовнішнього середовища і втома – все це теоретично і в лабораторних умовах важко відтворити точно, а звичайні випробування не дають всіх необхідних даних.

Тільки випробування мостів з доведенням конструкцій до руйнування дають можливість визначити реальну несучу здатність мостів, встановити характер руйнування, визначити найслабші елементи, з яких починається руйнування мостів, встановити вплив багаторічної експлуатації на параметри конструкцій.

За результатами саме цих випробувань найкраще перевіряти теорії розрахунку мостів, тому що є можливість порівняння теоретичних і експериментальних даних на всіх стадіях роботи конструкцій. Але варто відзначити, що такі випробування вимагають затрати значних коштів і дуже трудомісткі.

Зазвичай, випробовують до руйнування мости, які з тих чи інших причин були вилучені з експлуатації і підлягають розбиранню. Випробування організовують відповідно до мети і завдань, які необхідно вирішити під час цих випробувань. Розробляється програма випробувань, де приводяться способи завантажень і креслення від-

повідного обладнання, схеми установки приладів, порядок завантаження. Треба звернути увагу на те, що обладнання для випробування повинно бути розраховане на значні (не менше ніж у 2 рази) перевантаження у порівнянні з теоретичними (на випадок неспівпадання експериментального руйнуючого навантаження з теоретичним і для гарантування безпеки виконавців досліджень), а також на значні прогини балок (до 30–50 см). Для прикладу наведемо деякі випробування мостів із доведенням їх конструкцій до руйнування.

У 1952 році в Англії було проведено випробування до руйнування попередньо напруженого залізобетонного моста Саус-бенк (Лондон) завдовжки 86,56 м після довготривалої експлуатації [38, 127, 128]. Завантажувався крайній прогін нерозрізного трипрогонового мосту за схемою 23,138+17,225+23,138 м. Метою випробувань було дослідження роботи мосту під дією розрахункового навантаження, встановлення деформацій після перевантаження на 150–200 відсотків, визначення руйнуючого навантаження. Це був перший в Англії випадок випробування до руйнування цілої попередньо-напруженої споруди.

Початкова сила натягу кожного із 24 дванадцяти дротяних пучків дорівнювала 30 т. За проектом міцність бетону в 28-денному віці повинна була бути  $420 \text{ кг/см}^2$ , дослідження показали, що міцність бетону становить  $445 \text{ кг/см}^2$ .

Заміри прогинів виконувалися у всіх трьох нерозрізних прольотах в середині прольоту, в навантаженому прольоті – в чвертях і поблизу опор. Для цього були влаштовані такі вимірювальні пристрої. До нижньої частини прогонів були закріплені гачки, від яких вертикально вниз опускався дріт. За допомогою блока дріт відхилявся вбік і під невеликим кутом до горизонталі доходив до вимірювальної шкали, закріпленої на підставках і розташованої на безпечній відстані від моста (рис. 10.25). Далі дріт проходив через другий блок на кінці шкали і до кінця дроту за блоком прикріплювався вантаж. До дроту в межах шкали був закріплений вказівник, переміщення якого давало безпосередні відліки вертикальних переміщень прогонової будови.

Міст завантажувався штучними вантажами, які поступово встановлювались краном. Вантажі розподілялися таким чином, щоб створювалось рівномірно розподілене навантаження на прогоні довжиною 23,138 м. Еквівалентне рівномірно розподілене навантаження вираховували, прирівнюючи згинальний момент всередині прольоту, вирахований від вантажів, до виразу  $q_e l^2 / 8$  на прогоні довжиною 23,138 м.

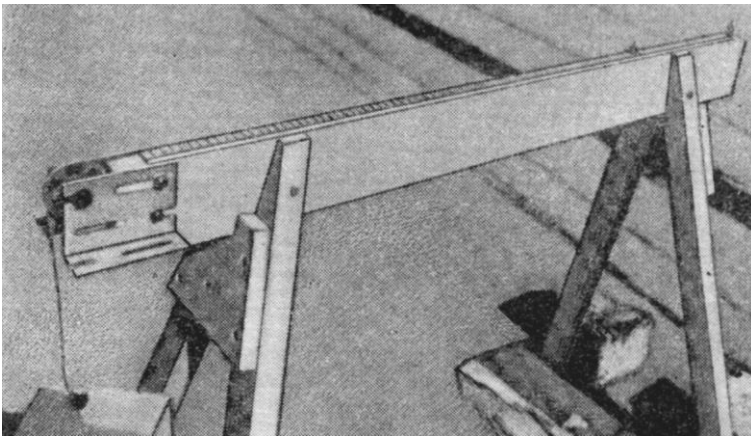


Рис. 10.25. Пристрій зі шкалою для заміру прогинів, зліва – блок, через який проходить дрiт із вантажем

У перший день випробувань мiст був завантажений розрахунковим тимчасовим навантаженням в  $488 \text{ кг/м}^2$ , потiм навантаження збiльшили до  $610 \text{ кг/м}^2$  (перевантаження 50%). На кожнiй стадiї навантаження замиряли прогини, максимально досягнуте навантаження залишили на нiч i зняли на другий день зранку наростання прогину. Потiм навантаження зняли повнiстю i записали залишковi прогини. Мiст завантажили iз стовiдсотковим перевантаженням, зафиксували прогини i трiщини, що утворились. Пiсля цього зняли навантаження i вiдмiтили залишковi прогини.

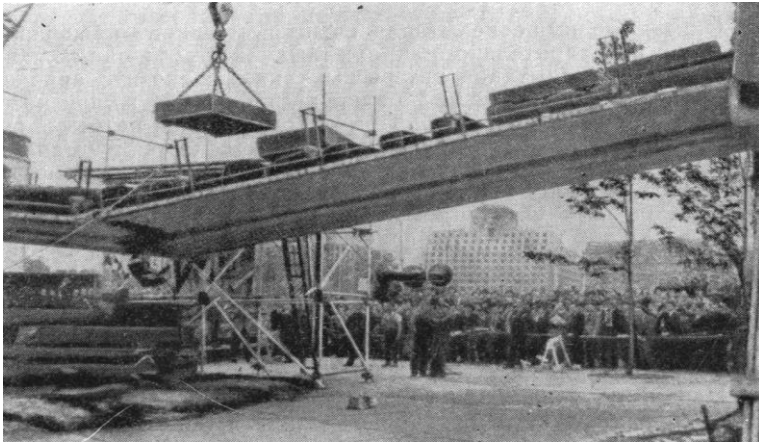
На третiй день випробувань мiст навантажили спочатку до 100% перевантаження i пiсля пiвторагодинної перерви продовжували навантажувати прогонову будову аж до її руйнування.

Перед самим руйнуванням загальне тимчасове випробувальне навантаження складало 86 т, що вiдповiдає рiвномирно розподiленому навантаженню  $1152 \text{ кг/м}^2$ . Мiст зруйнувався пiсля завантаження ще 3,5 т, спочатку всерединi прольоту (рис. 10.26), а потiм – бiля опор (рис. 10.27).

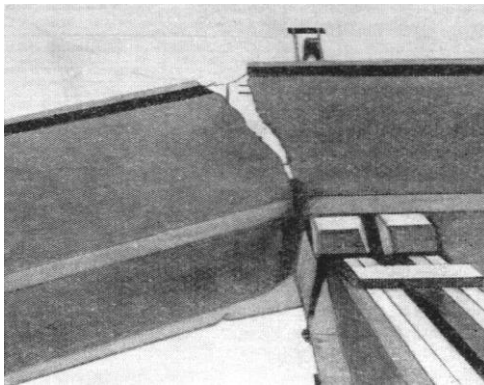
На рис. 10.28 показанi епюри прогинiв у всiх трьох прольотах за ступенями завантаження. Максимальний прогин при навантаженнi  $1152 \text{ кг/м}^2$  сягнув 29,2 см.

На рис. 10.29 показанi графiки залежностi прогинiв вiд навантаження, яке показано у вiдсотках вiд розрахункового тимчасового навантаження  $488 \text{ кг/м}^2$ . Iз рисунка видно, що коли навантаження довели до  $976 \text{ кг/м}^2$  (200%), а потiм зняли його залишкових прогинiв практично немає (крива 2). Появу залишкових деформацiй (прогинiв) на кривiй 1 дослiдники пояснюють порушенням випро-

бувального пристрою. Міст зруйнувався під навантаженням 89,5 т, при цьому еквівалентне рівномірно розподілене навантаження було рівне  $1220 \text{ кг/м}^2$  (крива 3).



*Рис. 10.26.* Руйнування під час випробувань моста Саус-бенк всередині прольоту



*Рис. 10.27.* Руйнування при випробуваннях моста Саус-бенк біля опори

Руйнування наступило практично одночасно всередині прольоту і над опорою (*рис. 10.26 і 10.27*) від руйнування стиснутої зони бетону. Сталеві пучки арматури не зруйнувалися. Після руйнування було виявлено відсутність зчеплення в деяких місцях між сталевією арматурою і бетоном внаслідок того, що розчин не пройшов при нагнітанні в арматурні канали на всю довжину. Було зроблено висновок про необхідність вдосконалення процесу нагнітання розчину в арматурні канали.

На початку 90-х років ХХ століття науковцями Львівського політехнічного інституту проведено випробування з руйнуванням шляхопроводу у м. Винники, який експлуатувався більше двадцяти ро-



ків. Досліджувались просторова робота і напружено-деформований стан прогонових будов на стадіях експлуатаційних та руйнуючих навантажень до і після поширення накладною плитою.

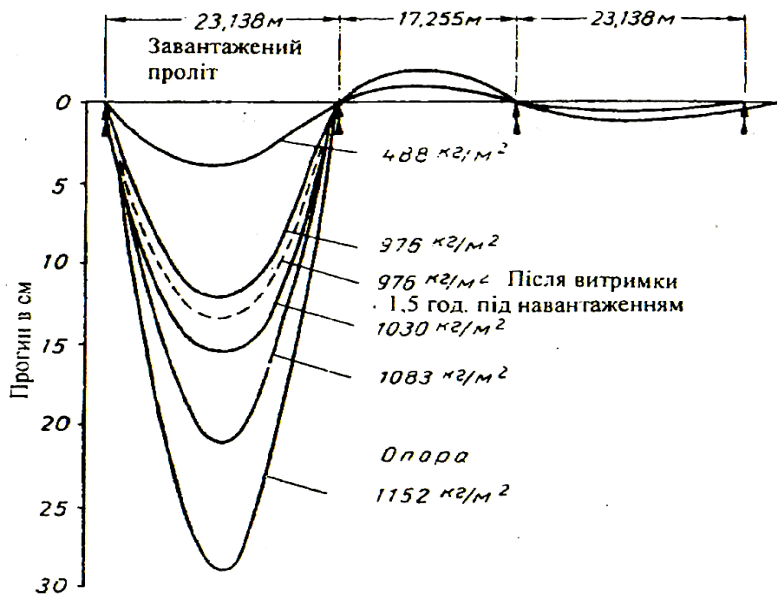


Рис. 10.28. Епюри прогинів трьох прольотів моста Саус-бенк при випробуваннях

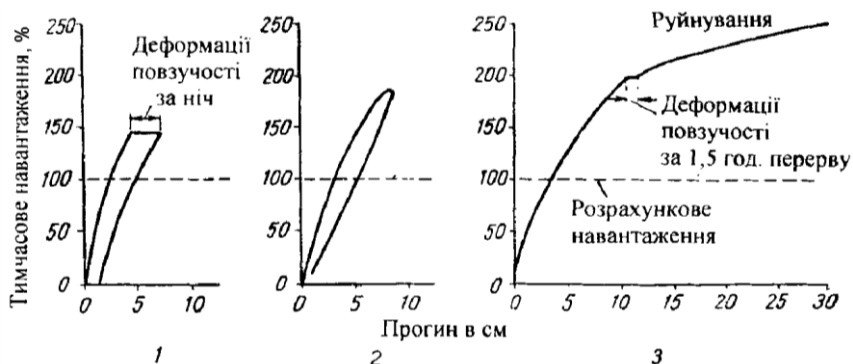


Рис. 10.29. Графіки прогинів всередині звантаженого прольоту моста Саус-бенк:

1 – при звантаженні моста до 150% розрахункового тимчасового навантаження, витримки і розвантаження; 2 – при звантаженні моста до 200% розрахункового тимчасового навантаження і розвантаження;

3 – при звантаженні до руйнування

Випробовувались крайні прогонові будови існуючого шляхопроводу, який при перебудові розбирався і міг бути доведений до

руйнування (рис. 10.30, а). Прогони склалися зі шести збірних залізобетонних балок з арматурою довжиною 14,06 м за типовим проектом Союздорпроекту (вип. 56). Балки об'єднані поперек прольоту зварюванням закладних деталей поперечних діафрагм, розташованих по довжині балок через 2,7 м. Перший проліт випробовувався як існуюча прогонова будова після довготривалої експлуатації, третій проліт поширювався ребристою накладною плитою (2) і досліджувався як реконструйована прогонова будова. Окремі балки середнього прольоту випробовувались до руйнування на лабораторному стенді.

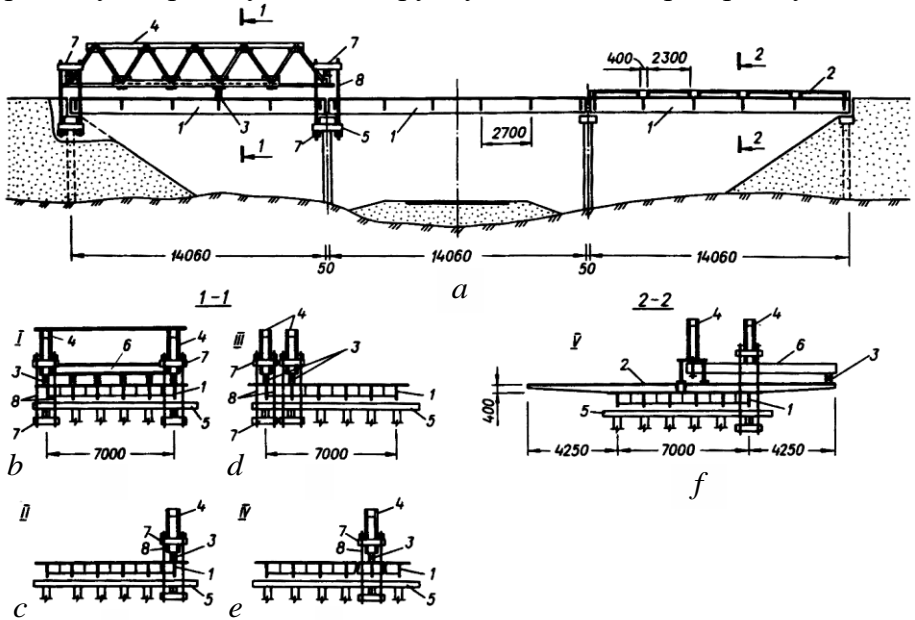


Рис. 10.30. Випробування до руйнування шляхопроводу у м. Винники: а – загальний вигляд шляхопроводу при випробуваннях; б, с, d, e – завантаження існуючої прогонової будови за схемами відповідно I, II, III, IV; f – завантаження консолі поширеної прогонової будови; 1 – існуючі балки; 2 – залізобетонна накладна плита; 3 – домкрати; 4 – металеві ферми; 5 – насадки опор; 6 – металева балка; 7 – опорні траверси; 8 – металеві тяги

Прогонова будова завантажувалась гідравлічними домкратами вантажопідйомністю 1000 і 2000 кН у комплекті із ручними насосними станціями. Передача навантаження здійснювалась за допомогою спеціального випробувального стенду, який складався з двох металевих ферм (4) довжиною 15 м і висотою 2,5 м, що сприймали навантаження від домкратів (3) і передавали його на насадки опор (5) через поперечну балку (6), систему опорних траверс (7) і металевих тяг (8).

Прогонові будови крайніх прогонів (до і після поширення) випробовувались за такими схемами:

Схема I – прогонова будова завантажувалась по черзі зосередженою силою в кожній точці перетину поздовжніх і поперечних балок (рис. 10.30, b). За цією схемою при кожному завантаженні отримали поверхні прогинів, деформації бетону і арматури балок і діафрагми;

Схема II – для визначення несучої здатності крайньої балки вона завантажувалася послідовно над лівою і правою крайніми прогоновими діафрагмами (рис. 10.30, c). При цьому зруйнувалася припорна ділянка тільки крайньої балки, а всі останні балки не отримали залишкових деформацій і можуть бути використані на наступних етапах досліджень;

Схема III – для визначення несучої здатності прогонової будови по згинальному моменту дві крайні балки з протилежного боку завантажувалися двома домкратами кожна над двома середніми діафрагмами (рис. 10.30, d).

Схема IV – випробування окремої балки існуючої прогонової будови. Для цього незруйнована при попередніх випробуваннях балка виділялась із прогонової будови розрізанням з'єднувальних накладок за всіма діафрагмами вздовж прольоту і завантажувалась домкратами над двома середніми діафрагмами (рис. 10.30, e).

Схема V – випробування консолі (тільки для поширеної прогонової будови) (рис. 10.30, f).

При випробуваннях за всіма схемами навантаження прикладалося ступенями, і на кожній вимірювалися у всіх точках перетину поздовжніх і поперечних балок прогини, деформації бетону стиснутої зони, поздовжньої робочої арматури і відігнутої арматури на припорних ділянках. Всього на прогоновій будові було встановлено 148 приладів – прогиномірів, індикаторів, мікроіндикаторів на базі. Фізико-механічні характеристики матеріалів дослідної конструкції визначалися випробуванням бетону балок неруйнуючим методом і відібраних зразків у лабораторії, арматури – випробуванням зразків арматури, відібраних із каркасів випробовуваних балок.

Для прикладу на рис. 10.31 показано порівняння епюр прогинів балок посередині прольоту існуючої і поширеної прогонових будов при установці сили  $P$  почергово над балками. Прогини балок, об'єднаних з накладною плитою, значно менші від прогинів існуючих балок. Це свідчить про надійне включення накладної плити у роботу з балками і суттєве підвищення жорсткості поширеної прогонової будови.

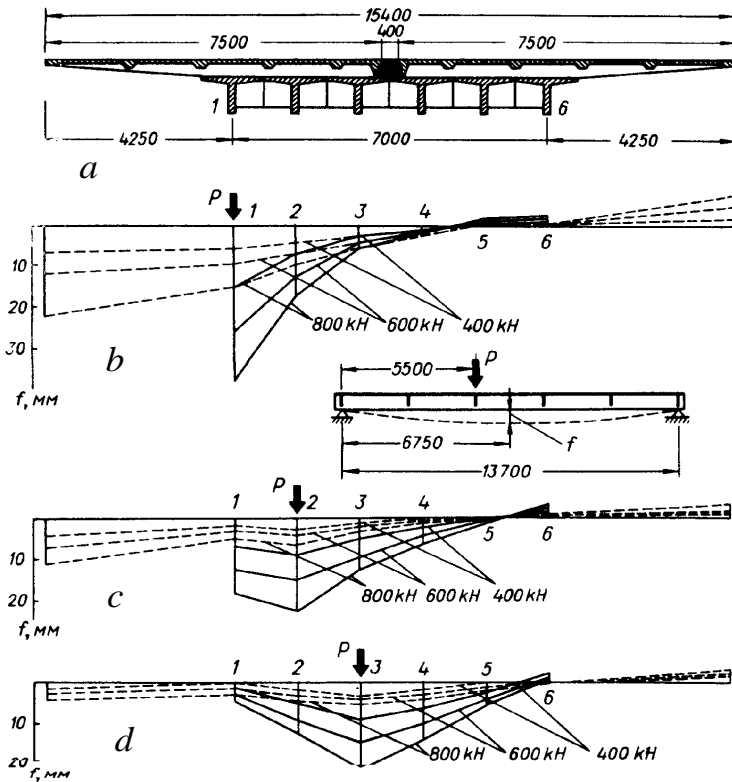


Рис. 10.31. Поперечний переріз дослідної конструкції прогонової будови моста (а), епюри прогинів на різних ступенях навантаження перерізу посередині прольоту при навантаженні  $P$  на балках 1(б), 2(с) і 3(д):

- прогини існуючої прогонової будови;
- - - прогини поширеної прогонової будови

За результатами випробувань до руйнування зроблено такі висновки [127, 128]:

- під час випробувань на поперечну силу існуючого прольоту при досягненні навантаження в 3,03 рази більше від розрахункового руйнуючого не було досягнуто повного руйнування приопорної зони балки, хоча ширина розкриття похилих тріщин становила 2 – 2,5 мм;

- несуча здатність прогонової будови по згинальному моменту більша в 2,53 рази у порівнянні з розрахунковою;

- при випробуваннях на поперечну силу поширеного прольоту прикладене навантаження перевищувало у 2,6 рази розрахункове, але руйнування на похилих перерізах не було досягнуто. Випробу-

вання зупинено внаслідок недостатньої несучої здатності випробувального стенду;

– несуча здатність балок поширеного прольоту по згинальному моменту у порівнянні з існуючим прольотом збільшилася більш ніж у 2 рази (наприклад, крайньої балки – у 2,24 рази).

Неспівпадання теоретичних і експериментальних результатів пояснюється тим, що при навантаженнях, близьких до експлуатаційних, проявляється пружно-пластичний характер роботи балок. В стадії, близькій до граничної за міцністю, їх початкова жорсткість зменшується в 1,8 – 2,2 рази. Розподіл зусиль в перехресно-ребристій системі у випадку, близькому до граничного інший, ніж у пружній стадії. Просторова робота конструкції залежить від характеристик жорсткості балок, які, в свою чергу, залежать від наявних тріщин і непружних деформацій в бетоні. В результаті проведених досліджень рекомендовано враховувати пружно-пластичну роботу балок з метою підвищення точності просторових розрахунків прогнових будов мостів.

### **10.7. Висновки до розділу 10**

На основі багаторічних випробувань та обстежень конструкцій мостів та їх аналізу, дали змогу розробити методику обстеження статичних і динамічних випробувань, а обробка і аналіз результатів обстеження і випробування мостів, уможливили встановити їх надійність і довговічність на відповідні терміни безпечної їх експлуатації. Наведені і описані у цьому розділі дослідження дали змогу сформулювати такі висновки:

1. Мостові споруди експлуатуються у складних умовах, тому потрібно періодично їх досліджувати, для гарантії надійності і безпечної та безаварійної експлуатації. За період багаторічних досліджень та обстежень мостів обґрунтовано в три стани досліджень, які описані в цьому розділі. Встановлено проведення періодичних оглядів двох видів, післяпаводкові та післяремонтні, та спеціальні огляди, які виконують спеціалізовані організації.

2. На підставі багаторічних досліджень [124, 127, 128] встановлено необхідність статичного випробування та розроблено програму досліджень, яка включає мету і задачі випробувань які наведено у цьому розділі. Зокрема, представлено статичне випробування мостів, показано установку статичного випробувального навантаження при різних схемах завантаження, також показано різні схеми установки прогиномірів на мостах.

3. Сформульовано мету динамічних випробувань мостів – це визначення величини динамічної дії, що створюється реальними рухомими навантаженнями та встановлень основних динамічних характеристик споруди – частоти і форм власних коливань. Представлено та описано реальні динамічні випробування низки мостів [127, 128]. Зокрема, встановлено горизонтальну дію на міст автомобілем під час динамічних випробувань. Розглянуто роботу вібраційної машини із вісьмома ексцентриками для випробування прогонових будов мостів.

4. Важливим моментом у випробуванні мостів є обробка і аналіз результатів обстеження та випробування мостів [124, 128]. Зокрема, необхідно скласти відомість дефектів за елементами споруди і дати оцінку за впливом на довговічність та експлуатаційні якості споруди і комфорту руху транспорту і пішоходів. Наведено залежності для визначення прогинів, коефіцієнта  $k$  який залежить від місця заміру прогинів і виду завантаження. Представлено приклад поперечного перерізу поширення накладною плитою прогонової будови моста та схеми напруженого стану перерізу при дії згинальних моментів і нормальної сили з відповідними розрахунковими залежностями. Розглянуто також основні види віброграм.

5. Сформульовано методіку дослідження мостів у лабораторіях. Описано конструкції моделі та геометричні розміри прогонової будови та наведено перехід зусиль до натурної споруди за теорією розширеної подібності. Представлено схему стенда для випробування великомасштабних моделей прогонових будов мостів, конструкцій, дослідних зразків та схему стенда для випробування мостових балок довжиною 24 м. та випробування мостів з руйнуванням конструкцій.

# 11. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТІ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

## 11.1. Характеристики випадкових величин

**Ймовірність.** Термінологія. Ймовірністю події  $A$  називається відношення кількості випробувань, сприятливих для події, до кількості всіх рівноможливих і попарно несумісних результатів випробування [124, 125, 128].

Математично величина  $A$  визначається за формулою

$$P(A) = \frac{m}{n}, \quad (11.1)$$

де:  $m$  – кількість випробувань, сприятливих для події  $A$ ;  $n$  – кількість всіх рівноможливих попарно несумісних випробувань.

**Дискретні випадкові величини.** Параметри, якими визначається несуча здатність споруди, мають випадковий характер. Справді, і механічні характеристики матеріалів, розміри перерізів конструкцій, і зовнішні навантаження ніколи не матимуть точно наперед заданих значень. Може йтися тільки про те, що ці параметри не виходять за межі деякої наперед заданої області. Тому параметри, які характеризують експлуатаційну придатність споруди, вважаються *випадковими*.

Термінологія. *Дискретною* випадковою величиною називають таку, яка набуває окремих ізольованих значень з визначеними ймовірностями. Кількість вірогідних значень дискретної випадкової величини може бути скінченна або нескінченна.

**Закон розподілу ймовірностей дискретної випадкової величини.** На перший погляд може видатись, що для визначення дискретної випадкової величини достатньо навести всі її значення. Але це не так: випадкові величини можуть мати однаковий перелік вірогідних значень, тоді як їхні ймовірності будуть різними. Тому закон розподілу дискретної випадкової величини задають таблицею, яку називають *рядом розподілу* або аналітичною функцією.

Ряд розподілу – це таблиця, у першому рядку якої подано можливі значення випадкової величини, а у другому – ймовірності, з якими ця випадкова величина набуває відповідних значень (*табл. 11.1*).

Оскільки  $A$  обов'язково матиме в одному випробуванні одне і тільки одне значення, додток ймовірності цих подій дорівнює одиниці:

$$\sum_{k=1}^n P_k = 1. \quad (11.2)$$

Ряд розподілу випадкових дискретних величин

$A$	$a_1$	$a_2$	$\dots$	$a_n$
$P(A)$	$P_1$	$P_2$	$\dots$	$P_n$

Стверджують, що події  $a_1, a_2, \dots, a_n$  створюють повну групу.

Одне можливе значення випадкової величини називається її реалізацією. Класичним прикладом дискретної випадкової величини є лабораторні випробування механічних властивостей будівельних матеріалів. На *рис. 11.1* побудовано гістограму лабораторних випробувань бетону на міцність.

За достатньої кількості випробувань закон розподілу можна задати неперервною функцією розподілу. За визначенням функція  $P(x)$  неспадна, причому  $P(-\infty) = 0$ ,  $P(\infty) = 1$ .

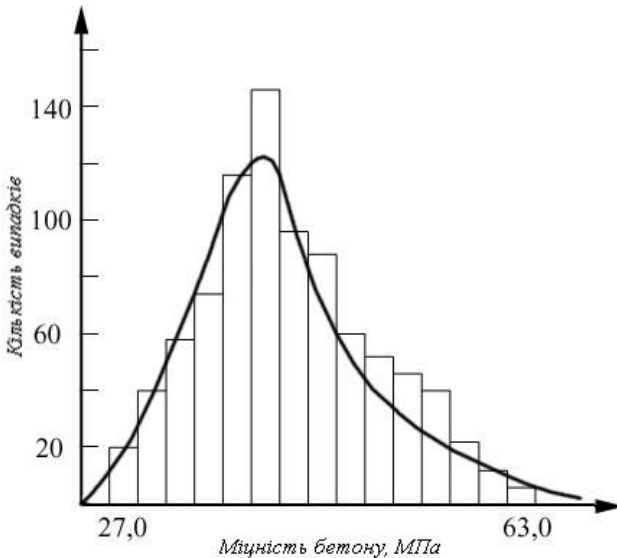
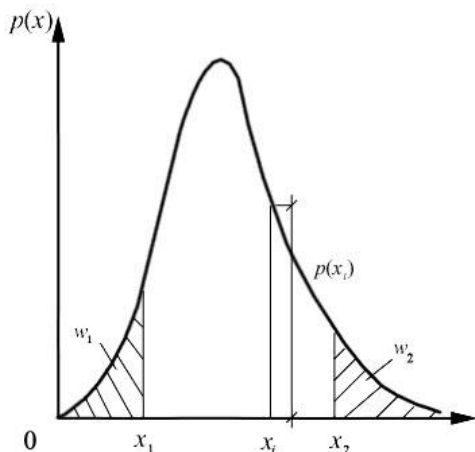


Рис. 11.1. Гістограма міцності бетону

**Термінологія.** Ймовірні властивості випадкової величини  $x$  визначаються за допомогою функції  $P(x)$ , яка показує ймовірність того, що випадкова величина приймає певне значення  $x$ :  $P(x) = P(x < x)$ . Функція розподілу дискретної випадкової величини є ступінчатою. Конструювати апарат математичної статистики, користуючись такою функцією, є складним завданням. Тому задану гістограму звичайно апроксимують придатною неперервною функцією, яку називають **кривою розподілу**.



Графік такої кривої показано на *рис. 11.2*. Тут на осі абсцис відкладають не кількість випадків, як для гістограми, а їхнє відношення до загальної кількості випробувань. На осі ординат завжди відкладають реалізації (значення) випадкової величини.



*Рис. 11.2.* Графік кривої розподілу щільності ймовірності

За цим графіком характеризують функцію розподілу  $P(x)$ .

Термінологія. Функція  $p(x) = \frac{dP(x)}{dx}$  – це щільність розподілу

неперервної випадкової величини з функцією розподілу  $P(x)$  або ж, точніше, крива розподілу щільності ймовірності (*рис. 11.2*).

В інших термінах, беручи до уваги визначення випадкової величини (11.1), щільність розподілу записують так:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x_0 \leq x \leq x_0 + \Delta x)}{\Delta x} = \frac{dP(x)}{dx}. \quad (11.3)$$

Щільність розподілу  $p(x)$  є однією з фундаментальних характеристик випадкової величини, оскільки вона задає закон розподілу. Звертається увага на той факт, що у теорії надійності найчастіше мають справу не з самою функцією розподілу  $P(x)$ , а з функцією щільності розподілу  $p(x)$ , зв'язаною з  $P(x)$  рівнянням (11.3). Хоча, маючи функцію  $p(x)$ , завжди можна отримати  $P(x)$  з співвідношення (11.3), яке можна переписати у вигляді

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx. \quad (11.4)$$

З огляду на це рівняння графік  $P(x)$  часто називають кривою розподілу випадкової величини  $x$  (рис. 11.3). Зауважимо, що площа кривої розподілу  $P(x)$  (рис. 11.3) дорівнює одиниці:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1. \quad (11.5)$$

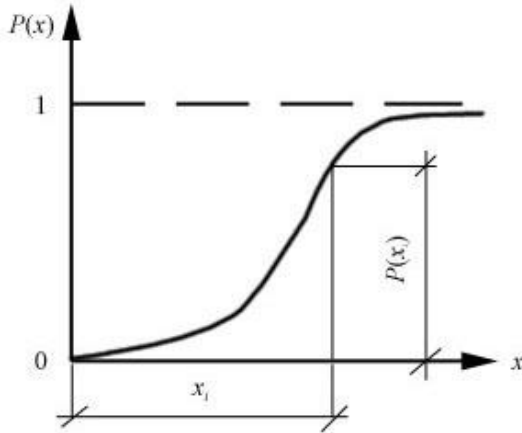


Рис. 11.3. Інтегральна крива розподілу

Окремі частини площі  $P(x)$ , також мають певний сенс:

- площа  $w_1$  є ймовірністю того, що реалізація випадкової величини  $x$  буде меншою, ніж  $x_1$ :  $P(x < x_1)$ ;
- площа  $w_2$  є ймовірність того, що реалізація  $x$  буде більшою, ніж  $x_2$ :  $P(x < x_2)$ ;
- незаштрихована частина  $w_3$  (рис. 11.2) є ймовірність того, що реалізація  $x$  лежатиме між  $x_1$  та  $x_2$ :  $P(x_1 < x < x_2) = w_3$ .

## 11.2. Нормальний розподіл

Нормальний розподіл (закон Гаусса) – найбільш розповсюдженіший теоретичний розподіл. Він використовується тоді, коли відхилення результатів процесу в додатну та від’ємну сторони рівноймовірні. До таких випадків можна зарахувати розподіл міцності бетону, власної маси будівельних конструкцій, відхилень деяких геометричних розмірів конструкцій і будівель, продуктивності праці на виробництві тощо.

Основне обмеження тут – порівняно малий вплив усіх факторів. Якщо ця умова не виконується, і одна з випадкових величин

домінує над усіма іншими, то закон її розподілу може змінити розподіл величини, яка вивчається, тобто відхилити від нормального.

Нормальний розподіл характеризується формулою

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (11.6)$$

де:  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $\bar{x}$  – середнє значення;  $x$  – довільне значення.

Форма кривої нормального розподілу симетрична щодо відповідного середнього значення (рис. 11.4). Вона має дзвоноподібне окреслення і продовжується своїми гілками в плюс-мінус нескінченність. Пологість (або крутизна) кривої обумовлюється середньоквадратичним відхиленням.

Для визначення площ під кривою нормального розподілу розроблено спеціальні таблиці, наведені в багатьох монографіях з теорії ймовірності [128]. Фрагмент такої таблиці наведено нижче (табл. 11.2).

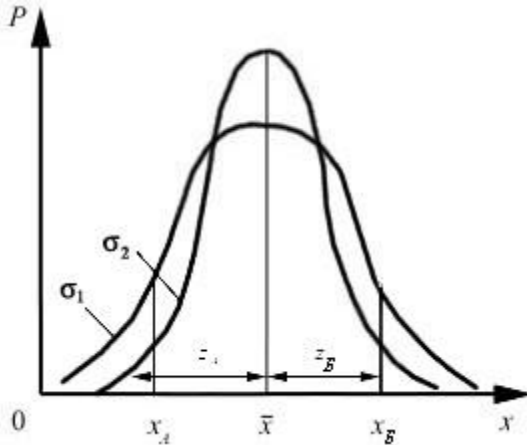


Рис. 11.4. Крива нормального розподілу

Визначення площ під кривою починають з обчислення кількості стандартів  $Z_A$  і  $Z_B$ , на яких перебувають одна ( $X_A$ ) і друга ( $X_B$ ) границі інтервалів. Потім за допомогою таблиць встановлюють площу під кривою, яка числово дорівнює ймовірності попадання дослідних значень у заданий інтервал:

$$Z_A = \frac{X_A - \bar{X}}{\sigma}, \quad Z_B = \frac{X_B - \bar{X}}{\sigma}. \quad (11.7)$$

Площі під кривою нормального розподілу в інтервалі від  $-\infty$  до  $Z$ 

$Z$	0,80	0,60	0,40	0,20	0,00
-3	-	-	-	0,0007	0,0014
-2	0,0026	0,0047	0,0082	0,0139	0,0228
-1	0,0359	0,0548	0,0808	0,1151	0,1587
-0	0,2119	0,2743	0,344(5	0,4207	0,5000
+0	0,7881	0,7254	0,6554	0,5793	0,5000
+1	0,9641	0,9452	0,9192	0,8849	0,8413
+2	0,9979	0,9953	0,9918	0,9861	0,9773
+3	-	-	-	0,9993	0,9987

**Приклад:** під час бетонування фундаментів під обладнання було відомо, що міцність бетону в них підчиняється закону нормального розподілення із середнім значенням, що дорівнює 20 МПа, і середньоквадратичним відхиленням 4 МПа. Необхідно визначити ймовірність того, що у фундаменті, який заново бетонується, міцність бетону не буде нижча 8 МПа ( $X_A$ ) і не вища 28 МПа ( $X_B$ ). Границі вказаних інтервалів показані на *рис. 11.2*.

Згідно з числовими даними матимемо

$$Z_A = \frac{8 - 20}{4} = -3, \quad Z_B = \frac{28 - 20}{4} = 2.$$

За *табл. 11.2* визначаємо площі  $P_A$  і  $P_B$ , які числово дорівнюють ймовірностям попадання випадкового значення міцності бетону в інтервалах від нуля до 8 МПа і від нуля до 28 МПа:

при  $Z_A = -3$  ймовірність становить  $P_A = 0,0014$ ;

при  $Z_B = 2$  ймовірність буде  $P_B = 0,9773$ .

Ймовірність попадання міцності бетону, яка нас цікавить, в інтервал 8..28 МПа дорівнює різниці знайдених вище ймовірностей  $P_A$  і  $P_B$  (*рис. 11.5*):

$$P_{AB} = P_A - P_B = 0,9773 - 0,0014 = 0,9759.$$

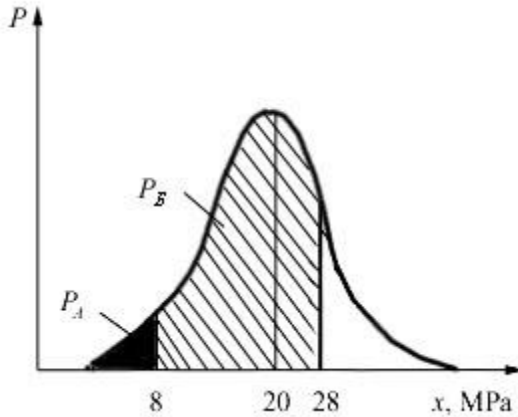
Отже, ймовірність того, що у фундаменті, який заново бетонується, міцність бетону на стиск перебуватиме в інтервалі 8..28 МПа, становить 0,9759, або приблизно 97,6%, що задовольняє ДБН.

Визначення параметрів розподілу подано нижче. Крива нормального розподілу має максимум при  $x = \bar{x}$ , симетрична відносно прямої  $x = \bar{x}$  і має вісь абсцис асимптотою (*рис. 11.6*). Вона прямує

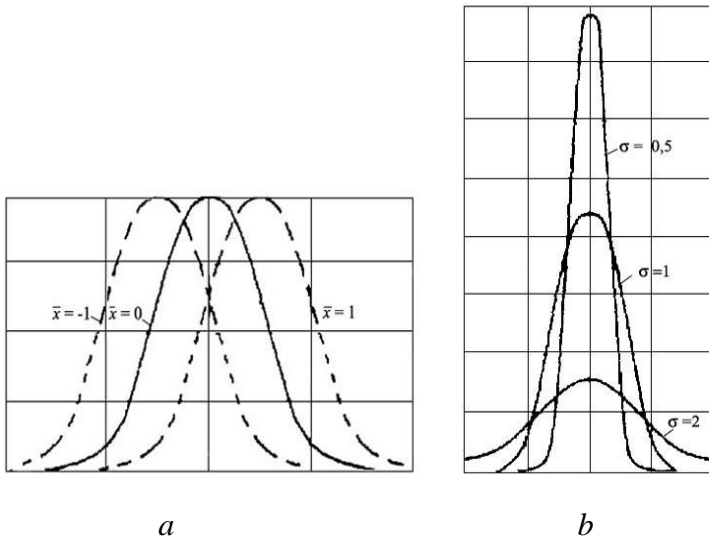
до нескінченності по обидва боки від прямої  $x = \bar{x}$ , її ординати швидко зникають.

*Зауваження.* Постійний множник  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$  уведено до виразу

(11.6) для того, щоб площа кривої розподілу дорівнювала одиниці. На *рис. 11.6* наведено графіки кривої нормального розподілу при різних значеннях параметрів  $\sigma$  та  $\bar{x}$ .



*Рис. 11.5.* Визначення ймовірності за нормального закону розподілу



*Рис. 11.6.* Нормальний розподіл: *a* – з різними значеннями  $\bar{x}$  при  $\sigma = 1$ ; *b* – з різними значеннями  $\sigma$  при  $\bar{x} = 0$

Нормальний розподіл називають також Гауссовим, за ім'ям видатного німецького математика К. Гаусса (1777–1833 рр.), який вперше запропонував його в своїй теорії похибок. Інтегральна крива нормального розподілу за Гауссом має вигляд

$$P(x) = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (11.8)$$

де  $t = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$ ;  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – функція Лапласа.

Останній вираз в теорії математичної статистики називають інтегралом ймовірності. У довідниках [93, 128] подані таблиці значень функції Лапласа  $\Phi(t)$ , тому вираз інтегральної функції звичайно записують так:

$$P(x) = 0,5 + \Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right). \quad (11.9)$$

Нормальний розподіл є фундаментальним у математичній статистиці. Він приймається за модель багатьох фізичних явищ. Його широке розповсюдження пояснюється тим, що при великих значеннях кількості випробувань розподіл наближається до нормального початкового розподілу.

Нормальний розподіл найчастіше застосовують у дослідженні надійності споруд. Саме він був покладений в основу норм проектування мостів СНиП 2.05-03-84 [28, 39, 128]. Надійність споруд за сучасними нормами Європи – Єврокодами, також здебільшого розраховують за нормальним розподілом.

**Параметри розподілу.** Термінологія. Математичним сподіванням (середнім значенням) дискретної випадкової величини  $x$  називається сума добутків всіх її можливих значень на їх ймовірності. Загальноприйнятим позначенням цієї характеристики є

$$M(x) = x_1 P_1 + x_2 P_2 + \dots + x_n P_n. \quad (11.10)$$

Крива розподілу має за параметри характеристики випадкових величин математичного сподівання  $M(x)$  та дисперсію  $\sigma^2(x)$ .

Ймовірний сенс математичного сподівання такий: параметр  $M(x)$  приблизно дорівнює середньому арифметичному випадкової величини  $x$ . Це твердження тим точніше, що більше реалізацій  $x$  враховується:

$$M(x) = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{n}. \quad (11.11)$$

Математичне сподівання нерідко називають центром розподілу через аналогію з поняттям центра ваги в механіці.

Дисперсія – міра розсіювання випадкової величини навколо математичного сподівання.

**Термінологія.** Дисперсією випадкової величини  $x$  називають математичне сподівання квадрата відхилення випадкової величини від її математичного сподівання:

$$D(x) = M(x - M(x))^2. \quad (11.12)$$

Для обчислення дисперсії конкретної випадкової величини звичайно користуються формулою

$$D(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 P_i - [M(x)]^2. \quad (11.13)$$

**Термінологія.** Квадратний корінь з дисперсії називається середнім квадратичним відхиленням випадкової величини або її стандартом. Зауважимо, що саму дисперсію  $D(x)$  також часто позначають як  $\sigma^2(x)$ .

**Вплив параметрів нормального розподілу на форму кривої.** Параметри нормального розподілу  $\bar{x}$  – математичне сподівання та  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення нерідко доводиться підбирати, щоб крива розподілу якомога ближче була до даних гістограмми. Покажемо, як вони впливають на форму кривої.

Зі зміною параметра  $\bar{x}$  форма нормальної кривої не міняється, вона тільки переміщається уздовж осі  $x$ : праворуч, якщо  $\bar{x}$  зростає, і ліворуч, якщо зменшується (рис.11.6).

Щоб показати вплив параметра  $\sigma$  нагадаємо, що при  $x = \bar{x}$  функція має максимум  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ . Отже, зі зростанням  $\sigma$  максимальна ордината зменшується, а сама крива стає пологішою (рис.11.6, b).

**Правило трьох сигм** допомагає розв'язати найважливішу задачу теорії ймовірності: визначити ймовірності того, що випадкова величина  $x$  за абсолютним значенням буде меншою, ніж задане додатне число  $a$ , тобто необхідно знайти ймовірність виконання нерівності  $|x - \bar{x}| < \delta$  чи подвійної, еквівалентної першій, нерівності  $-\delta < x - \bar{x} < \delta$ .

Для нормального розподілу ймовірність обчислюють за формулою

$$P(|x - \bar{x}| < \delta) = 2\Phi\left(\frac{\delta}{\sigma}\right), \quad (11.14)$$

де:  $\Phi(\cdot)$  – функція Лапласа;  $\bar{x}$  – математичне сподівання.

Якщо у формулі (11.9) прийняти  $\bar{x} = 0$ , то отримаємо

$$P(|x| < \delta) = 2\Phi\left(\frac{\delta}{\sigma}\right). \quad (11.15)$$

За допомогою формули (11.14) розв'язується задача про ймовірність того, що абсолютна величина відхилення буде меншою, ніж  $3\sigma$ . Замінивши у формулі (11.14)  $\delta$  на  $3\sigma$ , матимемо

$$P(|x - \bar{x}| < 3\sigma) = 2\Phi(3) = 2 \cdot 0,49865 = 0,9973.$$

Інакше кажучи, ймовірність того, що абсолютна величина відхилення буде більшою, ніж три середньоквадратичні відхилення, дуже мала, а саме:

$$1 - P(|x - \bar{x}| < 3\sigma) = 1 - 0,9973 = 0,0027. \quad (11.16)$$

Це означає, що подія може відбутись тільки у 0,27% випадків. Такі події, враховуючи принцип неможливості маловірогідних подій, можна вважати **практично неможливими**. У цьому полягає правило трьох сигм.

**Правило трьох сигм.** Якщо випадкова величина розподілена нормально, то абсолютне її відхилення від математичного сподівання буде не більше, ніж потроєне середнє квадратичне відхилення.

### 11.3. Логарифмічно-нормальний розподіл

Логарифмічно-нормальний розподіл описує неперервну величину, логарифм якої розподілений за нормальним законом. На відміну від нормального розподілу, який часто застосовується для опису великої кількості похибок, логарифмічно-нормальний використовується для аналізу випадкової величини, значення якої одержують в результаті перемноження великої кількості незначних похибок [128].

Логарифмічно-нормальний розподіл застосовують у тих випадках, коли більшість результатів спостережень відхиляється від середнього в менший бік (*рис.11.7*).

Це може виникнути під час будівництва монолітних споруд у ковзній опалубці.

Якщо побудувати розподіл товщини стіни за висотою споруди, то всі значення цього параметра групуватимуться біля певної величини. Але в незначній кількості перерізів товщина стіни матиме дуже великі відхилення в бік збільшення. Вони зумовлені причинами, які проявляються випадково. Наприклад, зношення щитів опалубки і з'єднань між ними може проявитись після встановлення частини конструкцій. Після виявлення дефекту і його усунення товщина стіни знову зменшиться, наближаючись до проектного роз-



міру. Але перерізи, виконані за допомогою неякісної опалубки, і які мають значно більший розмір порівняно з іншими, впливатимуть на середнє значення товщини стіни, змістивши її до більшого.

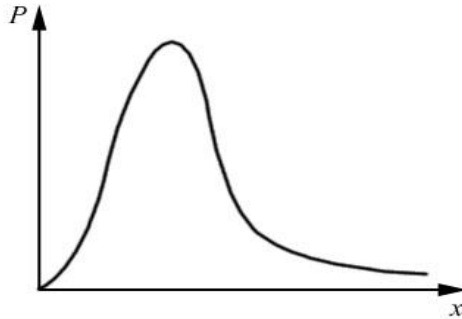


Рис.11.7. Логарифмічно-нормальний розподіл

Логарифмічно-нормальний розподіл виражається формулою

$$y = \frac{1}{xa\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - b)^2}{2a^2}}, \quad (11.17)$$

де

$$a^2 = \ln\left(\frac{\sigma^2}{\bar{x}^2} + 1\right), \quad b = \ln(\bar{x}) - 0,5a^2. \quad (11.18)$$

Для визначення площ під кривою в заданому інтервалі, як і за нормального розподілу, знаходять значення  $Z$ , за допомогою якого згідно з даними *табл. 11.2* обчислюють ймовірності

$$Z = \frac{1}{a}(\ln x - b). \quad (11.19)$$

Через складність обчислень за наведеними формулами тут бажано використовувати спеціально розроблені програми на ПК.

**Приклад:** в 113 силосних банках монолітних елеваторів, зведених за допомогою ковзної опалубки, одержані середні значення товщини стінок (*рис.11.8*).

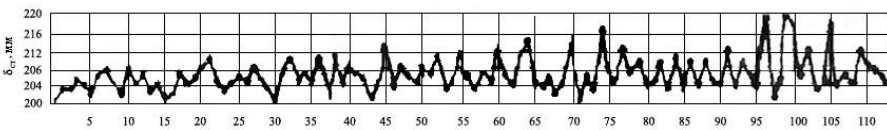


Рис. 11.8. Результати вимірювань товщини стінок силосних банок

Збільшення товщини стінки на 2 см проти проекту означає перевитрату бетону на 10%. Для визначення споживання бетону необхідно з'ясувати, яка ймовірність того, що в елеваторі, що за-

плановано будувати, товщина стінок силосних банок буде на 2 см більша від проектної (при проектній товщині 20 см).

Для розв'язання поставленої задачі на основі даних (рис.11.8) будують гістограму (рис.11.9).

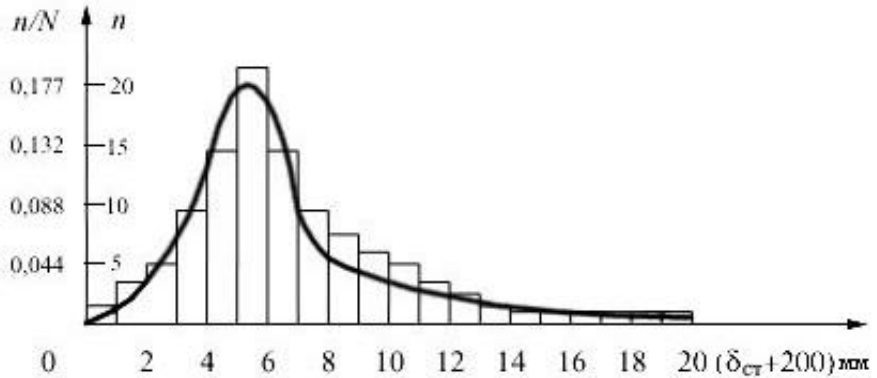


Рис.11.9. Розподілення товщин стінок силосних банок

Вона має явне зміщення в бік менших значень товщин стінок. Цю гістограму доцільно описати логарифмічно-нормальним розподілом. Обчислимо його параметри. Середнім значенням всіх вимірювань є 207 мм, стандарт – 4,08 мм. За формулами (11.18)

$$a^2 = \ln\left(\frac{4,08^2}{207^2} + 1\right) = 0,000388, \quad b = \ln(207) - 0,5 \cdot 0,000388 = 5,330.$$

Визначимо кількість стандартів, на яку відстоїть значення 202 см від середнього

$$Z = \frac{1}{\sqrt{0,000388}}(\ln 220 - 5,330) = 0,323$$

Нехай  $Z = 0,4$ . Тоді за таблицею визначаємо ймовірність того, що товщина стінки силосу буде меншою 22 см. Ця ймовірність дорівнює 0,6554. Ймовірність перебільшення тієї величини становитиме значення  $1-0,6554=0,3446$  або 34,46%.

Отже, з ймовірністю майже 35% буде допущена перевитрата бетону на 10% і більше. Тому, у зв'язку з такою великою ймовірністю додаткових затрат необхідно вжити заходів для поліпшення якості технології зведення стін у ковзній опалубці.

#### 11.4. Обернений нормальний розподіл і апостеріорний розподіл його параметрів

З множини теоретичних розподілів, які можна з успіхом використати під час дослідження активної роботи елементів конструкцій

і споруд, деталей машин, тривалості обслуговування тощо, заслуго-  
вує уваги обернене нормальне (IN-розподілення), за допомогою  
якого можна деякою мірою відтворити модель руйнування будівель-  
них конструкцій і описати розкриття нормальних тріщин у залі-  
зобетонних елементах, що зазнають згину. Можна вивчати апосте-  
ріорний розподіл, використовуючи баєсівський підхід, і методами  
характеристичних функцій визначати основні параметри обернено-  
го нормального і апостеріорних розподілів [128, 129].

Розглянемо  $IN(\alpha, \beta)$  – розподілення з густиною

$$p(x; \alpha; \beta) = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi}} x^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{\alpha\beta^2(x-\beta^{-1})^2}{2x}}, \quad x > 0, \alpha > 0, \beta > 0. \quad (11.20)$$

Для одержання характеристичних функцій апостеріорних роз-  
поділів параметрів IN-розподілень введемо функції

$$T_v(z) = \int_0^{\infty} y^{v-1} e^{-y - \frac{z^2}{2y}} dy, \quad v > 0, \operatorname{Re} z \geq 0, \quad (11.21)$$

для яких справедливі такі формули

$$\frac{1}{z} \frac{dT_v(z)}{dz} = -T_{v-1}(z), \quad T_v(0) = \int_0^{\infty} y^{v-1} e^{-y} dy = \Gamma(v).$$

Нехай  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – випадкова вибірка з генеральної су-  
купності  $IN(\alpha, \beta)$ . Вважаючи, що нам нічого невідомо про параметр  
 $\omega = (\alpha, \beta)$ , для вибору апіорної густини використаємо ідею, описа-  
ну в роботах [128, 129]. Керуючись нею і обчисливши функцію пра-  
вдоподібності  $IN(\alpha, \beta)$ -розподілення, після ряду перетворень одер-  
жимо апостеріорну густину розподілу характеристики  $\omega = (\alpha, \beta)$ :

$$p(\alpha, \beta / x) = K \alpha^{\frac{n-1}{2}} e^{-\frac{nu\alpha}{2} \left[ 1 + \frac{\bar{x}}{u} \left( \beta - \frac{1}{x^2} \right) \right]}, \quad \alpha > 0, \quad (11.22)$$

де  $p(\alpha, \beta / x)$  – апостеріорна двовимірна густина розподілу параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ ;

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $\bar{x}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}$ ;  $u = \bar{x}_r - \frac{1}{\bar{x}}$ ;  $K$  – нормалізаційна константа.

Враховуючи це, характеристична функція, виражена через  
 $T_v(z)$ , є такою:

$$\varphi(s, t; \alpha, \beta) = K \sqrt{\frac{2n\bar{x}}{\pi}} e^{\frac{it}{\bar{x}}} \left( \frac{nu}{2} - is \right)^{-\frac{v}{2}} T_{\frac{v}{2}} \left( t \sqrt{\frac{u}{2\bar{x}} - \frac{is}{n\bar{x}}} \right), \quad (11.23)$$

де  $v = n - 1$ .

Підставляючи у вираз значення константи  $K$ , одержаної з рівності  $\varphi(0;0;\alpha,\beta)=1$ , маємо

$$\varphi(s,t;\alpha,\beta) = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(\frac{nu}{nu-2is}\right)^{\frac{\nu}{2}} e^{\frac{it}{\bar{x}}} T_{\frac{\nu}{2}} \left(t \sqrt{\frac{u}{2\bar{x}} - \frac{is}{n\bar{x}}}\right). \quad (11.24)$$

Проінтегрувавши двовимірну густину (11.22) за одним із параметрів, одержимо маргінальну густину іншого, з якої за правилом множення ймовірностей знаходимо умовні апостеріальні густини (табл. 11.3).

(Видно, що густина розподілів  $\alpha$  і  $\alpha/\beta$  є густинами гамма-розподілення). Використовуючи характеристичні функції (див. табл. 11.3), визначаємо параметри, які нас цікавлять (табл. 11.4), в тому числі й загальні формули для обчислення початкових і центральних моментів.

Наприклад, для розподілу  $\alpha$

$$m_k = \frac{\nu(\nu+2)\dots[\nu+2(k-1)]}{(nu)^k},$$

$$\mu_k = \left(\frac{\nu}{nu}\right)^k \sum_{p=0}^k (-1)^{k-p} C_p^k \frac{\nu(\nu+2)\dots[\nu+2(p-1)]}{\nu^p}.$$

На основі одержаних вище результатів одержимо  $100(1-\gamma)\%$  – інтервали довіри (інтервали максимальної апостеріальної густини) для параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ .

Нехай  $\lambda$  – верхня межа шуканого інтеграла довіри для  $\beta$ . Очевидно, що таким інтервалом буде  $\left(\frac{2}{\bar{x}} - \lambda, \lambda\right)$ , оскільки апостеріорна густина  $p(\beta/\alpha)$  симетрична на ньому і в його центрі (точці  $1/x$ ) приймає максимальне значення. Таким чином, границю  $\lambda$  можна визначити з рівняння

$$\int_{\frac{2}{\bar{x}} - \lambda}^{\lambda} p(\beta/x) d\beta = 1 - \gamma, \quad (11.25)$$

(тут  $\gamma$  – рівень значимості), розв'язавши яке відносно  $\lambda$ , одержимо:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} - \sqrt{\frac{u}{\bar{x}\nu}} H_{\nu}^{-1}\left(\frac{3-\gamma}{4}\right),$$

значить, границі  $100(1-\gamma)\%$ -го інтервала довіри для параметра

$$\beta = \frac{1}{\bar{x}} \pm \sqrt{\frac{u}{\bar{x}\nu}} H_{\nu}^{-1}\left(\frac{3-\gamma}{4}\right). \quad (11.26)$$

де  $H_{\nu}(\cdot)$  – функція розподілу Ст'юдента дорівнюють.

Таблиця 11.3

Розподіл	Густина	Характеристична функція
Обернений нормальний IN ( $\alpha, \beta$ )	$(\alpha/(2\pi))^{1/2} \cdot x^{-3/2} \exp\{-(\alpha\beta^2)/(2x)(x-\beta^{-1})^2\}$	$e^{\alpha\beta} - \sqrt{\alpha^2\beta^2 - 2x\alpha}$
Двовимірний ( $\alpha, \beta$ )	$(\bar{x}/u)^{1/2} (nu/2)^{n/2} \alpha^{n/2-1} \times$ $\times \exp\{(nu\alpha/2)[1 + (\bar{x}/u)(\beta - 1/\bar{x})^2]\}$	$\{(nu/2)^{v/2} \cdot (nu/2 - is)^{-v/2}\} / \Gamma(v/2) \times$ $\times e^{iu/\bar{x}} \cdot T_{v/2} \cdot \sqrt{[u/(2\bar{x}) - i \cdot s/(n\bar{x})]} \cdot$ $(nu/2)^{v/2} \cdot (nu/2 - is)^{-v/2}$
Маргинальний $\alpha$	$[(nu/2)^{v/2} \cdot \alpha^{v/2-1} / \Gamma(v/2)] \cdot e^{-m\alpha/2}$	$[e^{iu/\bar{x}} \cdot \Gamma(v/2)] \times T_{v/2} \cdot \sqrt{[u/(2\bar{x})]}$
Маргинальний $\beta$	$(\bar{x}/u)^{1/2} [(1/2B(1/2, v/2)) \times$ $\times [1 + (\bar{x}/u)(\beta - 1/\bar{x})^2]^{-v/2}$	$\{1 - is \Gamma(nu/2) [1 + (\bar{x}/u) \times$ $\times (\beta - 1/\bar{x})^2] \}^{(-v+1/2)}$
Умовний $\alpha/\beta$	$\{(nu/2)[1 + (\bar{x}/u)(\beta - 1/\bar{x})^2]\}^{n/2} \times$ $\times \alpha^{n/2-1} \cdot \exp\{nu\alpha/2; [1 + (\bar{x}/u) \times$ $\times (\beta - 1/\bar{x})^2]\}$	$\exp[-t^2/(2n\bar{x}\alpha) + i(t/x)]$
Умовний: $\beta/\alpha$	$(2n\bar{x}\alpha/\pi)^{1/2} \cdot \exp[-(n\bar{x}\alpha/2)(\beta - 1/\bar{x})^2]$	

Основні ймовірнісні параметри оберненого нормального  
і апостеріорних розподілів

Вид розподілу	Мода	Математичне очікування	Дисперсія
$IN(\alpha, \beta)$	$-3 + \frac{\sqrt{9 + 4\alpha^2\beta^2}}{2\alpha\beta^2}$	$\frac{1}{\beta}$	$\frac{1}{\alpha\beta^3}$
$\alpha$	$\frac{\nu - 2}{nu}$	$\frac{\nu}{nu}$	$\frac{2\nu}{(nu)^2}$
$\beta$	$\frac{1}{\bar{x}}$	$\frac{1}{\bar{x}}$	$\frac{u}{\bar{x}(\nu - 2)}$
$\alpha/\beta$	$\frac{n - 2}{nu + n\bar{x}(\beta - 1/\bar{x})^2}$	$\frac{n + 2}{nu + n\bar{x}(\beta - 1/\bar{x})^2}$	$\frac{2(n + 2)}{nu + n\bar{x}(\beta - 1/\bar{x})^2}$
$\beta/\alpha$	$\frac{1}{\bar{x}}$	$\frac{1}{\bar{x}}$	$\frac{1}{n\bar{x}\alpha}$

Для параметра  $\alpha$ , оскільки його розподіл теж унімодальний, інтеграли апостеріорної густини мають вигляд  $\bar{\lambda}_e$ ,  $\bar{\lambda}_p$ , де самі границі  $\bar{\lambda}_e$ ,  $\bar{\lambda}_p$ , знаходимо за допомогою числового розв'язування пари рівнянь

$$\left(\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_n\right)^{\nu/2-1} = e^{-(\bar{\lambda}_n - \bar{\lambda}_e)(nu/2)}; \quad (11.27)$$

$$\int_{\bar{\lambda}_e}^{\bar{\lambda}_n} \alpha^{\nu/2-1} e^{-nu/2} d\alpha = \left[(1 - \gamma)(nu/2)^{\nu/2}\right] / \Gamma(\nu/2).$$

Таким чином, одержані апостеріорні розподіли і їх основні характеристики дають змогу робити певні висновки на основі вибірки про невідомі параметри IN-розподілу, за допомогою яких надалі можна описувати модель руйнування деяких будівельних конструкцій.

### 11.5. Розподіл Грама-Шарле

Узагальненням нормального розподілу є розподіл Грама-Шарле, відомий у вітчизняній літературі як розподіл типу А Лапласа-Шарле [128]. На відміну від нормального він може набувати різної несиметричної форми і характеризується різною скошеністю і крутизною (рис. 11.4).

Розподіл Грама-Шарле широко використовують під час досліджень технічного ресурсу гальм, швидкості руху транспортних потоків на дорогах з двома смугами за межами міста та в інших випадках.

В основі виводу рівняння цього розподілу лежить ряд, встановлений Чебишовим для виразу функції за допомогою многочленів.

Густина (щільність) розподілу подається у вигляді ряду від похідних нормальної густини (щільності)  $f(t)$

$$f_A(t) = f(t) - \frac{\mu_3}{6} f^{(3)}(t) + \frac{\mu_4 - 3}{24} f^{(4)}(t) - \frac{\mu_5 - 10\mu_3}{120} f^{(5)}(t) + \frac{\mu_6 - 15\mu_4 + 30}{720} f^{(6)}(t) + \dots \quad (11.28)$$

де:  $f(t)$  – густина нормального розподілу ( $a = 0$ ;  $\sigma = 1$ );  $\mu_3, \mu_4, \mu_5$  – постійні коефіцієнти;  $f^{(3)}(t), f^{(4)}(t), \dots, f^{(n)}(t)$  – відповідно 3, 4, ...,  $n$  – похідні від  $f(t)$  за аргументом  $t$ :

$$f^{(n)}(t) = \frac{d^n f(t)}{dt^n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{d^n}{dt^n} \left( e^{-\frac{t^2}{2}} \right). \quad (11.29)$$

Для густини розподілу  $f(t)$  і її перших шести похідних використовують таблиці.

Для практичних розрахунків особливо цікава функція густини (щільності), яка дає достатньо задовільну апроксимацію, виражену трьома членами такої формули:

$$f_A(t) = f(t) - \frac{\mu_3}{6} f^{(3)}(t) + \frac{\mu_4 - 3}{24} f^{(4)}(t), \quad (11.30)$$

де  $\mu_3, \mu_4$  – третій і четвертий центральні моменти, які визначаються згідно з виразами

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (t-a)^k f(t) dt; \quad (11.31)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}; \quad (11.32)$$

$$f^{(3)}(t) = -(t^3 - 3t)f(t), \quad f^{(4)}(t) = -(t^4 - 6t^2 + 3)f(t). \quad (11.33)$$

Перший член залежності (11.30) дає нормальний розподіл; другий відображає вилив косини кривої, третій – крутизни.

У задачах, де розглядається поведінка розподілу на його кінцях, апроксимація їх кінцевими рядами може бути вкрай незадовільною, тому кількість членів ряду необхідно збільшити або вибрати інший розподіл додатним.

Окрім того, під час інтерполювання проміжних значень необхідно стежити, зростає чи зменшується значення функції і відповідно додавати або віднімати пропорційні члени.

Для прикладу, запозиченого із літератури [128], обчислимо параметри розподілу Грама-Шарле для швидкості потоку автомобілів з шириною проїжджої частини дороги 7,0 м і 10%-м складом автопоїздів. Вихідні дані у загальній кількості спостережень були згруповані в 11 рівних інтервалах, довжину кожного з яких приймали такою, що дорівнює 5 км/год і наведені у *табл. 11.5*.

Визначимо математичне очікування за формулою

$$a = \bar{v} = \sum_{N=1}^{11} v_N r_N = 49,9,$$

де:  $v_N$  – середина інтервалу;  $r_N$  – частота.

Середнє квадратичне відхилення дорівнює кореню із суми членів ряду, тобто  $\sigma = \sqrt{114,5} = 10,7$ .

Для спрощення обчислень введемо нову нормовану випадкову величину

$$t_N = \frac{v_N - \bar{v}}{\sigma}. \quad (11.34)$$

Для розрахунку показників асиметрії і ексцесу обчислимо низку проміжних значень для  $t_N$ . Показник асиметрії дорівнює сумі всіх членів

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = 0,3239, \quad (11.35)$$

а ексцесу

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 = 2,6859 - 3 = -0,3141.$$

Використовуючи *табл. 11.5*, знайдемо величину функції  $f(t_N)$  для значень аргументу  $t_N$ .

Визначимо для всіх значень  $f^{(3)}(t_N) = -(t_N^3 - 3t_N)f(t_N)$  і  $f^{(4)}(t_N) = -(t_N^4 - 6t_N^2 + 3)f(t_N)$ . Функції  $f^{(3)}(t_N)$ ,  $f^{(4)}(t_N)$  можна обчислити за спеціальними таблицями.

Розрахуємо значення функції  $f_A(t_N)$  за формулою

$$f_A(t_N) = f(t_N) - \frac{\mu_3}{6\sigma^3} (t_N^3 - 3t_N) f(t_N) + \frac{1}{24} \left( \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 \right) (t_N^4 - 6t_N^2 + 3) f(t_N). \quad (11.36)$$



Таблиця 11.5

Статистична обробка швидкості потоку автомобілів з шириною проїжджої частини дороги 7,0 м і 10% складом автопоїздів

№ з/п, $N$	Середина інте- рвалів, $v_N$	Частота, $m_N$	Частотність, $r_N$
1	2	3	4
1	27,5	2	0,024
2	32,5	4	0,048
3	37,5	6	0,071
4	42,5	18	0,21
5	47,5	16	0,19
6	52,5	14	0,17
7	57,5	7	0,083
8	62,5	8	0,095
9	67,5	6	0,071
10	72,5	2	0,024
11	77,5	1	0,012

Продовження таблиці 11.5

$v_N \cdot r_N$	$(v_N - a)^2 r_N$	$t_N = \frac{v_N - a}{\sigma}$
5	6	7
0,66	12,042	-2,095
1,56	14,532	-1,626
2,66	10,917	-1,158
8,92	11,500	-0,691
9,02	1,094	-0,2242
8,92	1,149	0,2429
4,77	4,794	0,710
5,94	15,082	1,177
4,79	21,993	1,644
1,74	12,258	2,1113
0,94	9,141	2,5784
$\bar{v} = 49,91$	$\sigma^2 = 114,5$	

Продовження таблиці 11.5

$t_N^2$	$t_N^3$	$t_N^4$
8	9	10
4,368	-9,129	19,079
2,624	-4,252	6,8854
1,346	-1,561	1,8117
0,476	-0,3285	0,2267
0,049	-0,0112	0,0024
0,059	0,0143	0,0035
0,504	0,3579	0,2541
1,369	1,602	1,8742
2,690	4,411	7,2361
4,452	9,394	19,820
6,656	17,17	44,302

Продовження таблиці 11.5

$t_{N'_N}^3$	$t_{N'_N}^4$	$t_N^3 - 3t_N$
11	12	13
-0,2191	0,4579	-2,844
-0,2041	0,3305	+0,626
-0,1108	0,1286	+1,913
-0,069	0,0476	1,744
-0,0021	0,0005	+0,661
0,0024	0,0006	-0,714
0,0297	0,0211	-1,772
0,1522	0,1780	-1,929
0,3132	0,5138	-0,521
0,2255	0,4757	+3,060
0,2060	0,5316	2,1113
$\frac{\mu_3}{\sigma^3} = 0,3239$	$\frac{\mu_4}{\sigma^4} = 2,6859$	

Продовження таблиці 11.5

$t_N^4 - 6t_N^2 + 3$	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$	$f^{(3)}(t_N) = \text{CT13} \cdot \text{CT15}$
14	15	16
-4,129	0,0444	0,1263
-5,859	0,1064	-0,0666
-3,264	0,2040	-0,3903
0,370	0,3142	-0,5480
2,707	0,3891	-0,2574
2,649	0,3873	0,2765
0,229	0,3101	0,5495
-3,340	0,1996	0,3850
-5,904	0,1033	0,0538
-3,892	0,0430	-0,1316
7,366	0,0144	-0,6359

Продовження таблиці 11.5

$f^{(4)}(t_N) = \text{CT14} \cdot \text{CT15}$	$-\frac{\mu_3 f^{(3)}(t_N)}{6\sigma^3}$	$\left(\frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3\right) \cdot \frac{f^{(4)}(t_N)}{24}$
17	18	19
-0,1833	-0,0068	0,0024
-0,6234	0,0036	0,0082
-0,6659	0,0211	0,0087
0,163	0,0296	-0,0015
1,0531	0,0139	-0,0138
1,0259	-0,0149	-0,0134
0,0712	-0,0297	-0,0009
-0,6667	-0,0207	0,0087
-0,6099	-0,0029	0,0075
-0,1674	0,0071	0,0022
0,1061	0,0074	-0,0139

$f_A(t_N) =$ $= \tilde{n} \approx 15 + \tilde{n} \approx 18 + \tilde{n} \approx 19$	$f_A(v_N) = f_A(t_N) \cdot \frac{h}{\sigma}$	$F(v_N)$	$F(t_N)$
20	21	22	23
0,040	0,017	0,017	0,024
0,118	0,055	0,072	0,072
0,234	0,110	<u>0,182</u>	<u>0,143</u>
0,342	0,161	0,343	0,353
0,389	0,183	0,526	0,543
0,359	0,160	0,695	0,713
0,281	0,132	0,827	0,796
0,187	0,088	0,915	0,891
0,106	0,050	0,965	0,962
0,052	0,024	0,989	0,986
0,014	0,006	0,995	0,998

Розглянемо змінну швидкість  $v_N$ . Для цього всі значення  $f(t_N)$  помножимо на ширину інтервалу  $h = 5$  і поділимо на середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 10,7$ . Нанесемо на графік одержані теоретичні значення частоти (рис. 11.10).

Для узгодження за критерієм Колмогорова визначимо згромажені теоретичні й емпіричні частоти, послідовно підсумовуючи значення. Так, для емпіричних значень частоти в першому інтервалі одержуємо  $F_1(r_N) = 0,024$ , відповідно для другого матимемо

$$F_2(r_N) = F_1(r_N) + r_2 = 0,024 + 0,048 = 0,072.$$

В третьому інтервалі

$$F_3(r_N) = F_2(r_N) + r_3 = 0,072 + 0,071 = 0,143 \text{ і т.д.}$$

Для всіх інтервалів  $N = 1, 2, \dots, 11$  обчислюємо значення величин  $F(v_N)$  і  $F(r_N)$  і виберемо максимальні з них. У наведеному прикладі (табл. 11.5) воно підкреслено і розміщено в стовпцях 22–23:

$$k_0 = \max |F(v_N) - F(r_N)| = |F(v_3) - F(r_3)| = |0,182 - 0,143| = 0,039.$$

Визначимо

$$\lambda = k_0 \sqrt{n} = 0,039 \sqrt{84} = 0,36.$$

Таблиця 11.6

$$\text{Значення функції } f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3988	3987	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3250	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0388	0379	0371	0363
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0118	0116	0110	0107
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034

Значення  $P(\lambda)$  критерію Колмогорова

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,30	1,000	0,65	0,792	1,20	0,112
0,35	0,999	0,70	0,711	1,30	0,068
0,40	0,997	0,75	0,627	1,40	0,040
0,45	0,987	0,80	0,544	1,50	0,022
0,50	0,964	0,85	0,465	1,60	0,012
0,55	0,923	0,90	0,393	1,70	0,006
0,58	0,890	0,95	0,328	1,80	0,003
0,60	0,864	1,00	0,270	1,90	0,002
0,64	0,807	1,10	0,178	2,00	0,001

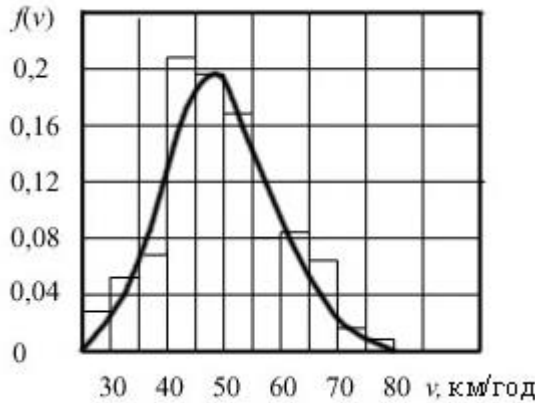


Рис. 11.10. Гістограма і густина (щільність) розподілу швидкості руху потоку автомобілів при 10%-му складі автопоїздів

Із табл. 11.7 для  $\lambda$ , розміщеного між значеннями 0,3 та 0,4, ймовірність узгодження  $P(\lambda) > 0,997$ , що варто вважати значним, тобто розподіл швидкості руху потоку автомобілів при 10%-му складі автопоїздів узгоджується з законом Грама-Шарлє.

### 11.6. Розподіл Вейбулла

Розподіл Вейбулла є одним з універсальних (рис. 11.11) [128]. Він описується формулою

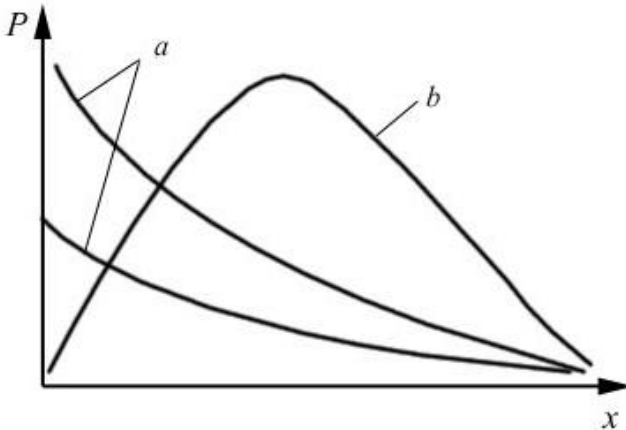
$$y = \frac{\beta}{\alpha} \cdot x^{\beta-1} e^{-\frac{x^\beta}{\alpha}}, \quad (11.37)$$

де  $\beta$  – визначається підбором з виразу

$$\frac{\delta}{\alpha} = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2}} - 1; \quad \alpha = \left[ \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \right]^\beta.$$

Тут  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функція.

Розподіл, який розглядається залежно від значень параметрів  $\beta$  і  $\alpha$  змінює свою форму від експоненціальної (крива *a* на *рис. 11.11*) до дзвоноподібної (крива *b* на цьому рисунку). Параметр  $\beta$  є фактично параметром форми розподілу,  $\alpha$  – параметр масштабу, який також називають характерним часом життя. Здебільшого розподіл Вейбулла використовується у формі, яка відповідає *рис. 11.11, b*. Його особливість полягає в тому, що він призначений для додатних величин, починається від нуля і правою віткою напрямлений у нескінченність. Добре описує ті дослідні дані, які мають великий (20 і більше відсотків) коефіцієнт варіації. До показників, які описуються за допомогою цього розподілу, належать окремі геометричні параметри конструкції (товщина плит перекриття, захисного шару бетону), перерви в роботі через відсутність будівельних матеріалів, терміни виконання робіт тощо.



*Рис.11.11.* Форми кривих розподілу Вейбулла

Для обчислення площі під кривою розподілу Вейбулла користуються формулою

$$P = 1 - e^{-\frac{x^\beta}{\alpha}}. \quad (11.38)$$

Ця формула обчислює її в інтервалі від нуля до  $x$ .

Через складність визначення параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ , а також ймовірностей (площ) користуються відповідними програмами, адаптованими для використання ПК.

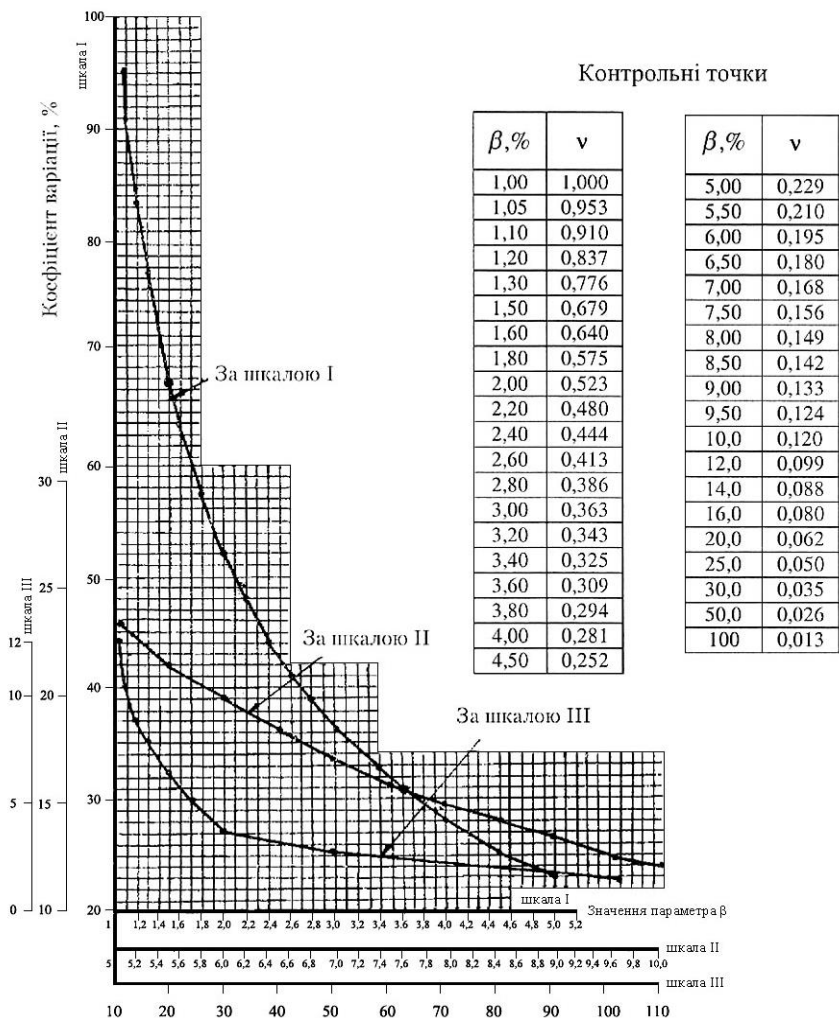


Рис. 11.12. Значення параметра  $\beta$  в розподілі Вейбулла від коефіцієнта варіації  $v$

Однак, в окремих випадках параметри розподілу можна знайти і вручну. Для цього використовують таблиці гамма-функцій для одержання параметра  $\alpha$ , а параметр  $\beta$  можна визначити за графіком, показаним на рис. 11.12, залежно від коефіцієнта варіації дослідних даних  $v$ . Ймовірність встановлюють звичайним способом,



використовуючи при тому, наприклад, добре відомі ще зі шкільної програми таблиці чотиризначних чисел Брадїса [128].

**Приклад:** у бригаді кінцевої продукції спеціалізована група арматурників підготує перелік робіт для групи бетонувальників. Спостерігали за часом запізнення підготовки опалубки та бетонування (рис. 11.13). За 124 спостереженнями середній час запізнення становить 8,23 год при коефіцієнті варіації 0,4915 або 49,15%. Керівництво будівництвом поставило завдання: якщо ймовірність запізнення більш як на 7 год перевищує 50%, то необхідно збільшити групу арматурників на ще одного робітника, якщо менше – розробити за інтенсифікацією праці групи арматурників.

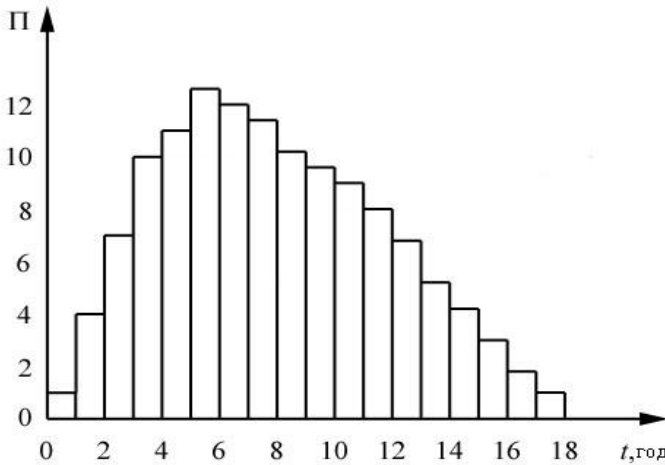


Рис. 11.13. Розподіл часу запізнення підготовки опалубки до бетонування

За величиною коефіцієнта варіації  $v = 2,142$ , використовуючи рис. 11.13, визначаємо значення параметра  $\beta = 2,15$ . Обчислюємо

$$\alpha = \frac{8,28}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,15}\right)} = 121,823.$$

Знаходимо ймовірність запізнення на час, менше 7 год:

$$P_7 = P(t < 7) = e^{-\frac{7 \cdot 15}{121,823}} = 0,4164.$$

Ймовірність запізнення більше ніж на 7 год становитиме  $1 - 0,4164 = 0,584$ , або 58,6%.

Прийнято рішення підсилити групу арматурників одним робітником.

## 11.7. Розподіл Пуассона

Під час розв'язування багатьох практичних задач у будівництві і транспорті необхідно оперувати дискретними величинами, які підкорюються розподілу [36, 128].

Розглянемо дискретну випадкову величину  $m$ , яка набуває тільки цілих додатних значень  $0, 1, 2, \dots, n$ .

Випадкова величина  $m$  розподілена за законом Пуассона (рис.11.14), якщо ймовірність того, що вона набуде визначене значення  $m$ , яке описується формулою

$$P(m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (11.39)$$

де:  $a$  – деяка додатна величина, яка називається параметром закону Пуассона і представляє математичне очікування;  $e$  – основа натурального логарифму, або постійна Ейлера, рівна 2,7183... .

Для закону Пуассона його числові характеристики рівні, тобто дисперсія випадкової величини дорівнює математичному очікуванню. Ця властивість розподілу Пуассона часто використовується на практиці для підтвердження гіпотези про пуассонівський розподіл; різка відмінність цих характеристик свідчить проти гіпотези.

Типовим прикладом випадкової величини, яка має розподіл Пуассона, є розподіл кількості автомобілів, які потребують заміни рульового управління, переднього і заднього мостів, розподіл кількості гілок маршруту тощо.

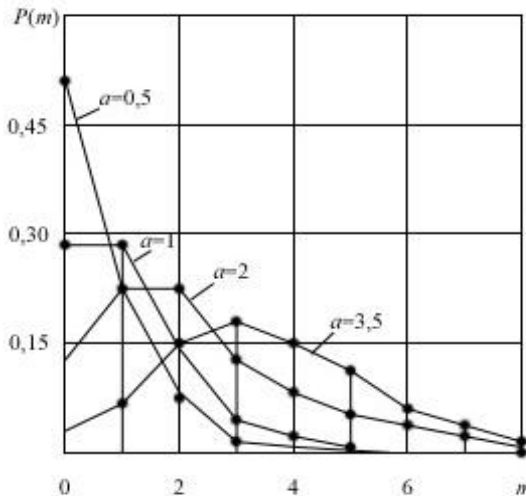


Рис. 11.14. Розподіл Пуассона при різних значеннях параметра  $a$

Розподіл Пуассона використовується тоді, коли велика кількість об'єктів розподілена однотипно на великій площі. Наприклад, у теорії транспортних потоків важливо знати кількість автомобілів, які розташовані на заданій ділянці автомобільної дороги.

Закон Пуассона може давати інколи добре вирівнювання і для неперервних випадкових величин. Тоді для такої величини зі щільністю  $f(t)$  кожний послідовний інтервал  $t_N$  з граничними значеннями  $(t_N^n, t_N^k)$  можна розглядати як дискретну випадкову величину  $m$ , яка набуває значень  $0, 1, 2, \dots, n$  з ймовірностями, що дорівнюють площам, обмеженими кривою  $f(t)$ , віссю абсцис і ординатами з відповідними граничними значеннями інтервалів  $(t_N^n, t_N^k)$ .

Розглянемо загальну задачу теорії ймовірності, яка призводить до розподілу Пуассона.

Нехай на осі  $ot$  випадково точки розподіляються так, що ймовірність попадання скільки завгодно точок на будь-який скінченний відрізок осі  $ot$  не залежить від кількості таких, які попали на інші відрізки осі, що не перетинаються, і розподіляються на цих відрізках, а залежить тільки від розміру відрізка. Необхідно визначити ймовірність  $P(m) = P(t = m)$  того, що на відрізок  $t$  потрапить рівно  $m$  точок, припускаючи, що вони розподілені по всій осі з однаковою середньою щільністю. Позначимо цю щільність, тобто середню кількість точок на одиницю довжини, через  $\lambda$ , тоді математичне очікування, тобто кількість точок, які попали на відрізок довжини  $t$ , дорівнює  $\lambda t$ .

Шукана ймовірність

$$P(m) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}. \quad (11.40)$$

Позначаючи  $\lambda t = a$ , одержимо

$$P(m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}. \quad (11.41)$$

Визначення параметра закону Пуассона на основі статистичного матеріалу розглянемо на **прикладі** [128, 151].

У результаті фіксування у перерізі ділянки поздовжнього профілю кількості автомобілів, які перетинають його за проміжок часу у 20 с, отримані дані (табл. 11.8).

Математичне очікування

$$a = 0 \cdot 0,44 + 1 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,17 + 3 \cdot 0,07 + 4 \cdot 0,017 + 5 \cdot 0,006 = 0,95 \cong 1$$

Дисперсія

$$D = \sigma^2 = 1 \cdot 0,44 + 1 \cdot 0,17 + 4 \cdot 0,07 + 9 \cdot 0,017 + 16 \cdot 0,006 = 1,1 \approx 1.$$

Математичне очікування і дисперсія дуже близькі, тобто відрізняються незначно.

Таким чином, шуканий параметр  $a = 1$ , а розподіл кількості автомобілів за 20 с. такий:

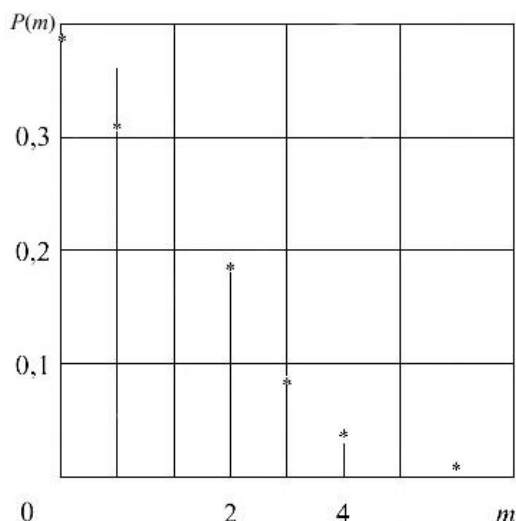
$$P(m) = \frac{1^m}{m!} e^{-1} = \frac{e^{-1}}{m!}. \quad (11.42)$$

Теоретичні значення на *рис. 11.15* позначимо вертикальними лініями, а експериментальні – мітками.

*Таблиця 11.8*

Дані про кількість автомобілів, які перетинають фіксовану ділянку поздовжнього профілю

№, $N$	Частота, $m_N$	Частотність, $r_N$	Теоретичний розподіл, $P(m)$	$ r_N - P(m) $
0	79	0,44	0,37	0,07
1	55	0,30	0,37	0,07
2	30	0,17	0,18	0,01
3	12	0,07	0,06	0,01
4	3	0,017	0,015	0,002
5	1	0,006	0,003	0,003



*Рис. 11.15.* Експериментальний і теоретичний розподіли кількості автомобілів в перерізі ділянки автодороги протягом 20 с

Враховуючи, що загальна кількість випадків 180, міра розбіжності  $\chi^2$  становить

$$\chi^2 = 180 \cdot \left( \frac{0,0049}{0,37} + \frac{0,0049}{0,37} + \frac{0,0001}{0,18} + \frac{0,000004}{0,0015} + \frac{0,000009}{0,003} \right) = 5,4.$$

Кількість ступенів свободи становить  $r=6-1-1=4$ , оскільки кількість значень 6, а розподіл Пуассона однопараметричний, тобто  $\zeta=1$ . За даними *табл. 11.9* для  $r=4$  і міри 5,4 одержуємо, що ймовірність узгодження експериментальних і теоретичних даних близька до  $P=0,2$ , що значно вище за прийняту 0,05, тобто шуканий розподіл узгоджується з законом Пуассона.

Розглянемо інший **приклад**.

Нехай для згаданої дільниці дороги відома інтенсивність руху  $N=180$  автомобілів за годину. Необхідно визначити ймовірність появи двох автомобілів протягом 1 хв.

Визначимо інтенсивність потоку [21,59]

$$\lambda = \frac{N}{3600} = \frac{180}{3600} = 0,05 \text{ автомобіля за секунду.}$$

Середня кількість автомобілів за 60 с становить  $a = \lambda t = 0,05 \cdot 60 = 3$  автомобілі. Шукана ймовірність

$$P(2) = \frac{a^2}{2!} e^{-a} = \frac{3^2}{2!} e^{-3} = \frac{9}{2} \cdot 0,05 = 0,225.$$

Розглянемо третій **приклад**. Нехай кількість бракованих будівельних виробів становить 2% всієї продукції. Визначимо ймовірність того, що в партії з 200 виробів бракованих 5. У нашому прикладі  $P = 0,02$ ;  $N = 200$ ;  $m = 5$ , значить  $a = 200 \cdot 0,02 = 4$ . Остаточню

$$P(5) = \frac{4^5}{5!} e^{-4} = 0,038.$$

Розглянемо ще дискретний розподіл Пуассона стосовно відмов будівельних споруд. Для характеристики ймовірності відмов, що трапляються в конструкціях транспортних споруд, нерідко застосовують формулу розподілу Пуассона. Вона призначена для дискретного ряду  $n$  незалежних величин, в якому ймовірність  $p$  появи  $k$  із них є мала:

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad (11.43)$$

де:  $n$  – кількість випробувань;  $k$  – кількість незалежних очікуваних подій ( $k < n$ );  $\lambda = np$  – параметр розподілу.

Таблиця 11.9

Значення  $\chi^2$  залежно від  $r$  та  $\rho$ 

$\rho$ $r$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41	6,64	10,83
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82	9,21	13,82
3	0,015	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	9,84	11,34	16,27
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28	18,46
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	13,39	15,09	20,5
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	15,03	16,81	22,5
7	1,239	1,564	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	16,62	18,48	24,3
8	1,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,1	26,1
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	19,68	21,7	27,9
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2	23,2	29,6
11	3,05	3,61	4,58	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68	22,6	24,7	31,3
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1	26,2	32,9
13	4,11	4,76	5,89	7,04	8,63	9,93	12,34	15,12	16,98	19,81	22,4	25,5	27,7	34,6

14	4,66	5,37	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,15	21,1	33,7	26,9	29,1	36,1
15	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	11,72	14,34	17,32	19,31	22,3	25,0	28,3	30,6	37,7
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,3
17	6,41	7,26	8,67	10,08	12,00	13,53	16,34	19,51	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	40,8
18	7,02	7,91	9,39	10,86	12,86	14,44	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
19	7,63	8,57	10,11	11,65	13,72	15,35	18,34	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	43,8
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
21	8,90	9,92	11,59	13,24	15,44	17,18	20,3	29,9	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	46,8
22	9,54	10,60	12,34	14,04	16,31	18,10	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
23	10,20	11,29	13,09	14,85	17,19	19,02	22,3	26,0	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	49,7
24	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,6	51,2
25	11,52	12,70	14,61	16,47	18,94	20,9	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,7	44,3	52,6
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,1
27	12,88	14,12	16,15	18,11	20,7	22,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	55,5
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
29	14,26	15,57	17,71	19,77	22,5	24,6	28,3	32,5	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	58,3
30	14,95	16,31	18,49	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7

Формула (11.43) – це математичний запис закону дискретного розподілу Пуассона, за яким  $P_n(k)$  – ймовірність того, що при  $n$  випробуваннях ( $n$  має великі значення) подія, ймовірність якої є  $p$ , настане рівно  $k$  разів.

Формула Пуассона є наближеною. Вона буде тим точнішою, що більша кількість випробувань. Це пояснюється тим, що формула називається асимптотичною. Для спрощення її запису часто ставлять знак рівняння.

### 11.8. Біноміальний розподіл

Біноміальний розподіл використовується в багатьох інженерних задачах під час розгляду незалежних випробувань, які багаторазово повторюються, для яких характерний один із двох можливих наслідків, які називаються успіхом або невдачею. Припускається також, що ймовірність успіху не змінюється від досліду до досліду [36, 128].

Біноміальний розподіл широко застосовують під час планування потреби у деталях, вузлах і запасних частинах на заводах будіндустрії. Окрім того, його вживають під час досліджень потоків руху автомобілів, у теорії надійності і за статистичного контролю якості. Він дає змогу описати потребу у матеріалах під час планування матеріально-технічного постачання у визначені терміни.

Біноміальний розподіл має вигляд

$$P(m) = \frac{n! p^m}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}, \quad (11.44)$$

де:  $P(m)$  – ймовірність появи успішних наслідків під час випробувань,  $n, m$  – відповідно кількість незалежних і успішних (результатів) випробувань;  $1-p$  – ймовірність неуспішного наслідку.

Числові характеристики цього розподілу – математичне очікування і дисперсія відповідно такі:

$$a = np; \quad (11.45)$$

$$\sigma^2 = np(1-p). \quad (11.46)$$

Параметр біноміального розподілу визначається залежністю

$$p = \frac{m}{n}. \quad (11.47)$$

Функція цього розподілу

$$F(m) = \sum_{m=0}^n C_n^m (1-p)^{n-m}. \quad (11.48)$$



При  $p = 0,5$  біноміальний розподіл симетричний і його можна апроксимувати нормальним з такими самими значеннями математичного очікування та дисперсії.

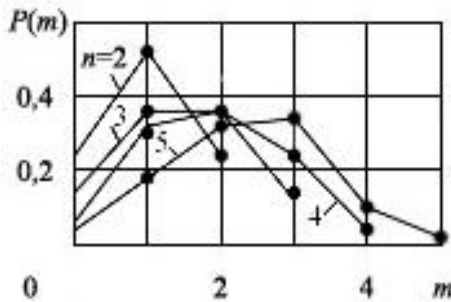
Коли число  $n$  більше, для спрощення обчислень застосовують наближену формулу Муавра-Стирлінга

$$n! \cong \sqrt{2\pi n} \cdot n^n \cdot e^{-n} \quad (11.49)$$

або

$$\lg n! \cong \left( n + \frac{1}{2} \right) \lg n - n \lg e = \lg \sqrt{2\pi} \cdot n. \quad (11.50)$$

Графік біноміального розподілу для значення  $p = 0,5$  показаний на *рис 11.16*.



*Рис. 11.16.* Біноміальний розподіл для різних значень  $n$

Як приклад [128] розглянемо наближення автомобіля до перехрестя де, як показали дослідження, ймовірність правого повороту  $p = 0,25$ , а лівий заборонений.

Ймовірність того, що один із трьох послідовних рухів автомобілів зробить правий поворот, описується біноміальним розподілом

$$P(t) = \frac{3!}{1! \cdot 2!} \cdot 0,25^1 (1 - 0,25)^{3-1} = 0,422.$$

### 11.9. Геометричний розподіл

У багатьох інженерних задачах під час виконання рівно  $m$  незалежних дослідів необхідно визначити ймовірність того, що після  $m-1$  невдалого з'явиться успішний результат [36, 128].

Нехай ймовірність успішного результату відома і дорівнює  $p$ . Тоді ймовірність появи  $m-1$  вдалих результатів, кожний з ймовірністю  $1-p$ , становить

$$P_i = (1-p)^{m-1}. \quad (11.51)$$

Таким чином, ймовірність того, що після  $m-1$  невдалих результатів з'явиться успішний, що дорівнює добутку цих ймовірностей і описується геометричним розподілом

$$P(m) = (1 - P)^{m-1} \cdot P, \quad m = 1, 2, \dots, n. \quad (11.52)$$

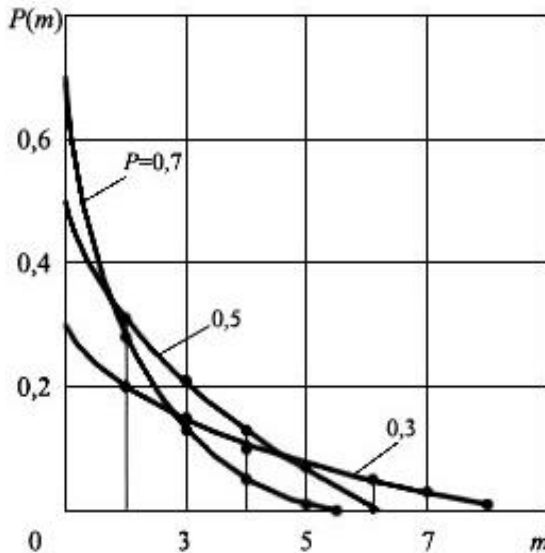
Графік такого розподілу наведено на *рис. 11.17*. Геометричний розподіл є однопараметричним, належить до дискретних, порівняно з біноміальним описується простішим рівнянням і широко використовується під час дослідження надійності вузлів конструкцій та агрегатів автомобілів, управління технічного постачання матеріалів і конструкцій.

Математичне очікування цього розподілу буде

$$a = \frac{1 - P}{P}, \quad (11.53)$$

звідки значення параметра  $P$  визначається на основі залежності

$$P = \frac{1}{a + 1}. \quad (11.54)$$



*Рис. 11.17.* Геометричний розподіл

Нехай у результаті вивчення потреби гальмівних камер автомобіля отримано статистичний ряд (*табл. 11.10*).

Необхідно перевірити гіпотезу про те, що цей ряд розподілений за геометричним законом. Визначимо математичне очікування

$$a = 1 \cdot 0,44 + 2 \cdot 0,28 + 3 \cdot 0,09 + 4 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,07 + 6 \cdot 0,035 + 7 \cdot 0,012 = 2,2.$$

$$\text{Тоді } P = \frac{1}{2,2+1} = 0,31.$$

Остаточню

$$P(m) = 0,69^{m-1} \cdot 0,31. \quad (11.55)$$

Таблиця 11.10

Статистична обробка потреби в задніх гальмівних камерах автомобіля

№, $N$	Частота, $m_N$	Частотність, $r_N$	Теоретичний розподіл, $P(m)$
1	28	0,44	0,31
2	24	0,28	0,22
3	8	0,09	0,15
4	6	0,07	0,10
5	6	0,07	0,07
6	3	0,035	0,04
7	1	0,0012	0,03

Визначаємо теоретичний розподіл (рис.11.18) у заданих точках:

$$P(1) = 0,69^0 \cdot 0,31 = 0,31, \quad P(2) = 0,69^1 \cdot 0,31 = 0,22,$$

$$P(3) = 0,69^2 \cdot 0,31 = 0,15, \quad P(4) = 0,69^3 \cdot 0,31 = 0,10,$$

$$P(5) = 0,69^4 \cdot 0,31 = 0,07, \quad P(6) = 0,69^5 \cdot 0,31 = 0,04,$$

$$P(7) = 0,69^6 \cdot 0,31 = 0,03.$$

Міра розбіжності становить

$$\chi^2 = 86 \cdot \left( \frac{0,13^2}{0,31} + \frac{0,06^2}{0,22} + \frac{0,06^2}{0,15} + \frac{0,03^2}{0,10} + 0 + \frac{0,005^2}{0,04} + \frac{0,018^2}{0,03} \right) =$$

$$= 86 \cdot (0,054 + 0,016 + 0,024 + 0,009 + 0,011) = 86 \cdot 0,114 = 9,8.$$

Кількість зв'язків буде  $r = 7 - 1 - 1 = 5$ .

Для  $\chi^2 = 9,8$  і  $r = 5$  за табл. 11.9 знаходимо, що ймовірність узгодження  $P = 0,1$ , яку варто визнати значимою, оскільки вона більша за 0,05. Отже, дані про потребу у задніх гальмівних камерах автомобіля узгоджуються з геометричним розподілом.

Розглянемо інший приклад використання геометричного розподілу. Нехай виготовлено три будівельні вироби. Якщо два із них пройдуть успішне випробування, то третій буде використаний у будівництві.

Потрібно визначити ймовірність того, що після успішного випробування (експерименту) двох виробів експеримент буде невдалим.

Нехай ймовірність успішного експерименту дорівнює  $P$ . Тоді ймовірність невдалого після двох успішних становить

$$P(3) = (1 - P)P^2. \quad (11.56)$$

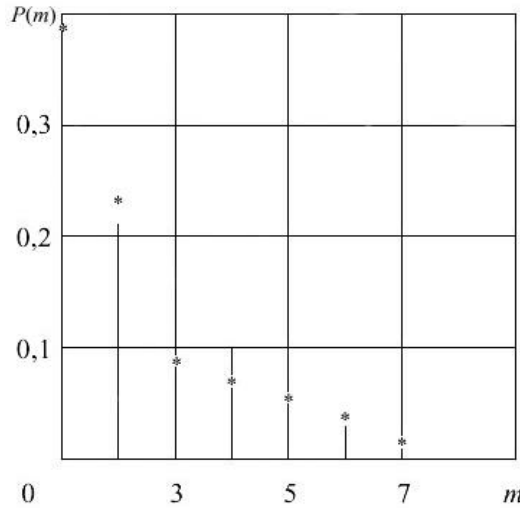


Рис. 11.18. Експериментальний і теоретичний розподіли потреб у задніх гальмівних камерах автомобіля

Визначимо значення максимальної ймовірності, тобто екстремум функції, що описується залежністю:

$$\frac{d}{dP} [P^2(1 - P)] = 0; \quad 2P(1 - P) - P^2 = 0; \quad 2P - 3P^2 = 0; \quad P = 0,66.$$

Отже, поява невдалого результату після двох успішних найімовірніша при  $P = 0,66$ , як при інших  $P$ .

Підставляючи у формулу (11.56)  $P = 0,66$ , одержимо:

$$P(3) = 0,34 \cdot 0,66^2 = 0,15.$$

Цю формулу необхідно вважати значимою, тобто у будівництві не доцільне використання третього виробу.

### 11.10. Висновки до розділу 11

Важливим інструментом дослідження будівельних матеріалів, конструкцій будівель і споруд є розроблені методи дослідження теорії ймовірності математичної статистики які наведено і описано в цьому розділі. Зокрема, характеристики випадкових величин та наведені закони теоретичних розподілів з їх алгоритмами і прикладами застосування, аналіз результатів досліджень дали можливість встановити такі висновки:

1. Для випробування та дослідження будівельних матеріалів і конструкцій дуже важливе місце займають методи дослідження

теорії ймовірності та математичної статистики. Зокрема, це теорії і закони неперервних випадкових величин та дискретні розподіли випадкових величин. Зокрема, встановлено термінологію ймовірності, дискретної випадкової величини, закони розподілу ймовірності дискретної випадкової величини. Встановлено, що подія  $A$  матиме в одному випробуванні тільки одне значення, тоді додаток ймовірностей цих подій дорівнює одиниці.

2. Встановлено, що функція розподілу дискретної випадкової величини є ступінчастою, користуючись такою функцією конструювати апарат математичної статистики є складною задачею. Тому задану гістограму апроксимують неперервною функцією, яку називають кривою розподілу, зокрема, наведено гістограму міцності бетону та графік кривої розподілу щільності ймовірності. Ілюстрація, що площа кривої розподілу  $p(x)$ , яку представлено на рисунку показує, що площа під кривою розподілу дорівнює одиниці.

3. Сформульовано низку законів неперервного розподілу випадкових величин, які описано відповідними формулами (залежностями) та з ілюстраціями на прикладах для різних законів розподілу. Зокрема, описано і проілюстровано такі закони розподілу: нормальний розподіл, логарифмічно-нормальний розподіл, обернений нормальний розподіл і апостеріальний розподіл його параметрів, розподіл Грама-Шарля та розподіл Вейбула.

4. Розглянуто та описано дискретні розподіли випадкових величин, які найчастіше зустрічаються з конкретними прикладами їх застосування. Зокрема, розподіл Пуассона, біноміальний розподіл та геометричний, які найчастіше використовуються для оцінки міцності матеріалів і конструкцій.

## 12. ТЕОРІЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, КОРЕЛЯЦІЙНО РЕГРЕСИВНИЙ АНАЛІЗ ТА КРИТЕРІЇ УЗГОДЖЕНОСТІ

### 12.1. Теорія математичного планування експерименту

**Загальні поняття.** Планований експеримент – це серія дослідів, поставлених за спеціальним планом, який дозволяє побудувати достовірну математичну модель явища або процесу, що вивчаються, найекономічнішим способом [128].

Як правило, результатом виконання планованого експерименту є рівняння регресії першого або другого порядків (тобто лінійне або квадратне). Побудова рівняння регресії зв'язана з величезними за обсягом обчисленнями. Тому актуальною задачею є зниження трудоемності оброблення дослідних даних.

З цією метою під час планування експерименту кодують фактори. Геометричне – це означає зміну початку відліку.

Наприклад, під час вивчення міцності бетону залежно від часу його термообробки кількість годин обігрівання може бути 4, 6, 8 (рис. 12.1).

Прийнявши в середньому час обігрівання 6 год, введемо умовний початок відліку від цього значення (точка 6 на рисунку). Тоді умовні значення часу обігрівання будуть  $-2, 0, +2$  (другий рядок на рисунку). Далі поділимо умовні значення на два. У результаті утворили повну систему вимірювань, в якій години обігрівання позначені  $-1, 0, +1$  (третій рядок). Отже, одержана нова система обчислення часу обігріву бетону.

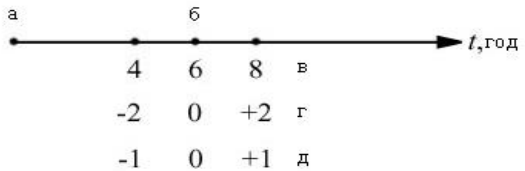


Рис. 12.1. Принципи кодування факторів

Кодують фактори за формулою

$$X_i = \frac{x_i - OP_i}{IB_i}, \quad (12.1)$$

де:  $X_i$  – кодове значення фактора;  $x_i$  – натуральне значення першого фактора;  $OP_i$  – основний рівень фактора;  $IB_i$  – інтервал варіювання рівнів фактора.

У планованому експерименті кодують всі фактори. До того ж за основний рівень беруть середньоарифметичне значення кожного

фактора, а за інтервал варіювання – різницю між середньоарифметичним і максимальним значеннями тих самих факторів. У прикладі, розглянутому вище, фактор «час обігрівання» мав основний рівень  $OP = 6$ , а інтервал варіювання  $IB = 8 - 6 = 2$ .

Отже, кодоване значення мінімального часу обігріву бетону

$$x = \frac{4 - 6}{2} = -1.$$

Перевага кодування факторів полягає у тому, що з подальшим виведенням рівняння регресії значно скорочуються обчислення. Для ще більшого їх зменшення кодові значення всіх факторів у цьому досліді підбирають так, щоб під час обчислення середніх значень і суми квадратів добутоків факторів вони дорівнювали нулю.

Припустимо, ставиться задача планування експерименту для побудови залежності «міцність бетону - час його термообробки і рухливість бетонної маси». Приймається, що час термообробки набуває значень 4 і 8 год, а рухливість бетонної маси, виражену через зсідання конуса 6 і 12 см. Вважаємо, що експеримент виконаний звичайними методами (табл. 12.1). У цьому випадку для побудови регресивного рівняння необхідно розв'язати систему двох рівнянь з двома невідомими:

$$\begin{aligned} \sum_{\Delta} y \cdot x_1 &= b_1 \cdot \sum_{\Delta} x_1^2 + b_2 \cdot \sum_{\Delta} x_1 \cdot x_2, \\ \sum_{\Delta} y \cdot x_2 &= b_1 \cdot \sum_{\Delta} x_1 + b_2 \cdot \sum_{\Delta} x_2^2. \end{aligned}$$

У разі кодування факторів (табл. 12.2) наведена система рівнянь включає нулі і посуті зникає:

$$\begin{aligned} \sum_{\Delta} y \cdot x_1 &= b_1 \cdot \sum_{\Delta} x_1^2 + b_2 \cdot 0, \\ \sum_{\Delta} y \cdot x_2 &= b_1 \cdot 0 + b_2 \cdot \sum_{\Delta} x_2^2. \end{aligned}$$

Коефіцієнти регресії можна обчислити за простою формулою

$$b_i = \frac{\sum_{\Delta} y \cdot x_i}{\sum_{\Delta} x_i^2}. \quad (12.2)$$

Таке полегшення стає особливо відчутне, коли факторів три і більше, оскільки обчислити велику кількість рівнянь, що становлять систему, вручну важко, а здебільшого неможливо.

Під час планування експерименту до факторів висувають такі вимоги:

- вони мають бути керованими;
- незалежними один від одного;

- вимірюваними і змінюватися в таких межах, щоб різниця в їх кратних значеннях була відчутною.

Таблиця 12.1

Умови та результати виконання дослідів  
(в натуральних показниках)

Міцність бетону, МПа, (У)	Час термообробки, год ( $X_1$ )	Осадка конуса, см ( $X_2$ )
19	8	12
17	4	12
26	8	6
21	4	6

Управління факторами означає, що їх числові значення може регулювати дослідник. Наприклад, експериментатор зможе змінити температуру зігрівання бетону, але не в силі змінити середньомісячну температуру зовнішнього повітря. У першому випадку фактор є керованим, у другому – некерованим.

Таблиця 12.2

Умови і результати виконання дослідів  
(в кодових показниках)

У	$X_1$	$X_2$
19	+1	+1
17	-1	+1
26	+1	-1
21	-1	-1

Незалежність факторів один від одного означає, що зміна значення одного фактора не повинна спричинити зміну значень іншого. Наприклад, якщо в експерименті як фактор використовувати міцність бетону і його початковий модуль пружності, то виявиться, що експеримент неможливо виконати, оскільки обидва фактори залежать один від одного. Введення їх в експеримент порушує вимоги керованості ними. Наприклад, якщо прийняти за фактор якість виконання робіт і вимірювати його за системою «добре-погано», то ніякого рівняння в результаті виконання дослідів не можна одержати.

Значення фактора в експерименті повинно змінюватись у таких межах, щоб не виникла ситуація, коли стає неможливо зарахувати значення фактора до того або іншого запланованого рівня. Наприклад, якщо у досліді за фактор прийнято міцність бетону в межах 20-21 МПа, то через випадкову її природу цілком ймовірно одержати



міцність 20,5 МПа. Тоді виникає невизначеність у зарахуванні фактичної міцності бетону до рівня 20 або 21 МПа. У наведеному прикладі міцність бетону повинна змінюватися у межах 20–30 МПа.

Доволі часто досліднику доводиться зосереджувати увагу на невивчених явищах. Тоді йому треба з'ясувати ті фактори, що найістотніше впливають на результат досліду. Таких, як правило, не дуже багато. Однак супутніх – завжди чимало. Наприклад, вивчаючи точність попереднього напруження арматури на круглі монолітні споруди (резервуари), необхідно аналізувати не менше 20 факторів (вигляд арматури, тип намотувального влаштування, стан поверхні бетону, температуру зовнішнього середовища тощо). Багато з цих факторів не відчутно впливають на точність натягу арматури. Для того, щоб з'ясувати їх номенклатуру, виконують так звані відсіювальні експерименти. Їхній сенс – одержати наближену залежність між результатом процесу і факторами. Цю залежність використовують для грубої орієнтації у впливі, що виявляє кожний з факторів, на результат досліду. З'ясувавши отже найзначиміші фактори, планують основний експеримент [128].

Існують поняття повного факторного експерименту і дробової репліки. Перший охоплює всі можливі поєднання факторів. Наприклад, якщо уявити план експерименту у вигляді куба, то в повному факторному експерименті досліди виконують в усіх вершинах куба (рис. 12.2), матриця планування тут виглядає так, як це наведено в табл. 12.3.

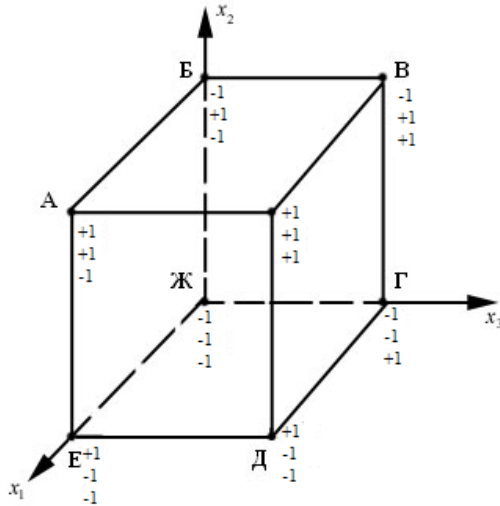
Таблиця 12.3

Матриця планування повного факторного експерименту

№ з/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Вершини куба
1	+1	+1	+1	И
2	-1	+1	+1	В
3	+1	-1	+1	Д
4	-1	-1	+1	Г
5	+1	+1	-1	А
6	-1	+1	-1	Б
7	+1	-1	-1	Е
8	-1	-1	-1	Ж

У повному факторному експерименті кількість дослідів дорівнює  $2^p$ , де  $p$  – кількість факторів. Вже за п'яти факторів кількість дослідів стає 32, при 6 – 64, при 7 – 128 і т. д. Отже, повний факторний експеримент економічно недоцільний.

Тому були створені так звані дробові репліки, які являють собою частини повного факторного плану. Наприклад, в *табл. 12.4* подана 1/2 репліка від повного факторного експерименту (*табл. 12.3*). Кількість дослідів тут удвічі менша, а результат – рівняння регресії, одержують такий самий. Отже, дробові репліки дають змогу значно скоротити обсяг експерименту. Це ще одна значна перевага теорії планування експериментів.



*Рис. 12.2.* Умовне зображення трифакторного експерименту:

- – умови виконання повного факторного експерименту;
- о – умови виконання експерименту за 1/2 репліки

Викладені способи планування експериментів дозволяють запроектувати ортогональні матриці. Це означає, що після перетворення матриці в систему лінійних рівнянь у ній всі неквадратні члени, які входять у ліві частини рівнянь, перетворюються в нулі.

**Методика планування експерименту.** Планування експерименту можна розділити на два етапи:

Виконання відсіювальних експериментів; покрокове дослідження за повними факторними планами або дробовими репліками. Враховуючи недостатню кількість публікацій з практичного використання планів експериментів у будівництві, нижче в максимально простій формі подамо відповідні рекомендації. Відсіювальні експерименти виконують з метою приблизної орієнтації серед безлічі факторів і для точнішого планування. Ці експерименти можна виконати за мінімальними дробовими репліками, які дозволяють отримати модель першого порядку, що визначається типом, який наведений у *табл. 12.5* згідно з даними в стовпці за № 14.

Матриця планування для дробової репліки

№ з/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Вершини куба
1	+1	+1	+1	И
2	-1	+1	-1	Б
3	+1	-1	-1	Е
4	-1	-1	+1	Г

За моделлю ранжують фактори, які входять у неї. Використовуючи результати ранжування, а також ґрунтуючись на економічних міркуваннях, відсіюють незначимі фактори. Потім досліджують ті, що залишалися для одержання математичної моделі процесу.

У *табл. 12.5* наведені мінімальні дробові репліки відповідних факторних планів. Користуватися цією таблицею можна так. Для кількості факторів сім і менше треба виконувати перші вісім дослідів; при кількості 8-14 – перші 16, при 15 і вище – 32 досліди. Для обробки даних експерименту використовують формули (12.3) та (12.4). Знаки «+» і «-» в плані експерименту означають кодування рівнів факторів «+1» і «-1». Їх визначають за формулою (12.1).

Після відсіювання незначимих факторів їхня кількість стає не настільки істотною (рідко понад шести). Тому для одержання математичної моделі процесу можна використати типовий план експерименту для шести факторів (*табл. 12.6*).

Цей план є центральним композиційним ортогональним планом другого порядку, який заснований на повному факторному експерименті першого порядку. Це означає, що під час виконання експерименту можливо обмежити кількість дослідів за умови задоволення отриманої залежності потреб експериментатора.

Якщо необхідно виконати дослід з кількістю факторів менше шести, обсяг дослідів скорочується і їх необхідно виконувати відповідно до *табл. 12.7*.

Для призначення конкретних рівнів факторів (у *табл. 12.5* вони позначені «+», «-», «0», «+ $\alpha$ », « $\alpha$ », «- $\alpha$ ») потрібно застосовувати формулу (12.1). Приймають такі значення: для двох факторів  $\alpha = 1$ ; для трьох –  $\alpha = 1,215$ ; для чотирьох –  $\alpha = 1,41$ ; для п'яти –  $\alpha = 1,59$ ; для шести –  $\alpha = 1,170$ .

З метою скорочення кількості дослідів можливий так званий «кроковий аналіз», оснований на використанні різноманітних дробових реплік. Тому після частини дослідів необхідно обробити їх ре-

зультати для одержання моделі процесу. У разі незадовільних результатів за статистичними або інженерними критеріями експерименти продовжуються. Стратегію експерименту наведено в *табл. 12.8*.

*Таблиця 12.5*

План відсіювальних експериментів

№ з/п	Рівні факторів												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+
3	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
5	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-
6	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+
8	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+
9	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
10	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
11	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+
12	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+
13	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+
14	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+
15	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-
16	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-
17	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+
19	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-
20	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
21	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-
22	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-
23	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+
24	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+
25	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
26	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
27	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+
28	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+
29	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+
30	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+
31	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-
32	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-

Звічення табл. 12.5

№ з/п	Рівні факторів											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
3	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
5	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-
6	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+
7	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	+
8	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-
9	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
10	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
11	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+
12	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-
13	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+
14	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-
15	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-
16	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
17	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
19	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+
20	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-
21	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+
22	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-
23	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-
24	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+
25	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+
26	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-
27	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	-
28	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+
29	+	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-
30	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+
31	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
32	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-

## Типовий план експерименту для шести факторів

№ п/п	Рівні факторів					
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
1	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	+	+	+
3	+	-	+	+	+	+
4	-	-	+	+	+	+
5	+	+	-	+	+	+
6	-	+	-	+	+	+
7	+	-	-	+	+	+
8	-	-	-	+	+	+
9	+	+	+	-	+	+
10	-	+	+	-	+	+
11	+	-	+	-	+	+
12	-	-	+	-	+	+
13	+	+	-	-	+	+
14	-	+	-	-	+	+
15	+	-	-	-	+	+
16	-	-	-	-	+	+
17	+	+	+	+	-	+
18	-	+	+	+	-	+
19	+	-	+	+	-	+
20	-	-	+	+	-	+
21	+	+	-	+	-	+
22	-	+	-	+	-	+
23	+	-	-	+	-	+
24	-	-	-	+	-	+
25	+	+	+	-	-	+
26	-	+	+	-	-	+
№ п/п	Рівні факторів					
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
27	+	-	+	-	-	+
28	-	-	+	-	-	+
29	+	+	-	-	-	+
30	-	+	-	-	-	+
31	+	-	-	-	-	+
32	+	+	+	+	+	-
33	+	+	+	+	+	-
34	-	+	+	+	+	-
35	+	-	+	+	+	-
36	-	-	+	+	+	-
37	+	+	-	+	+	-
38	-	+	-	+	+	-
39	+	-	-	+	+	-
40	-	-	-	+	+	-
41	+	+	+	-	+	-
42	-	+	+	-	+	-
43	+	-	+	-	+	-
44	-	-	+	-	+	-
45	+	+	-	-	+	-
46	-	+	-	-	+	-
47	+	-	-	-	+	-
48	-	-	-	-	+	-
49	+	+	+	+	-	-
50	-	+	+	+	-	-
51	+	-	+	+	-	-
52	-	-	+	+	-	-
№ п/п	Рівні факторів					
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
53	+	+	-	+	-	-
54	-	+	-	+	-	-
55	+	-	-	+	-	-
56	-	-	-	+	-	-
57	+	+	+	-	-	-
58	-	+	+	-	-	-
59	+	-	+	-	-	-
60	-	-	+	-	-	-
61	+	+	-	-	-	-
62	-	+	-	-	-	-
63	+	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-
65	+	0	0	0	0	0
66	-	0	0	0	0	0
67	0	+α	0	0	0	0
68	0	-α	0	0	0	0
69	0	0	+α	0	0	0
70	0	0	α	0	0	0
71	0	0	0	+α	0	0
72	0	0	0	-α	0	0
73	0	0	0	0	+α	0
74	0	0	0	0	α	0
75	0	0	0	0	0	+α
76	0	0	0	0	0	-α
77	0	0	0	0	0	0
78						

Таблиця 12.7

## Обсяг експерименту залежно від кількості факторів

Порядок моделі	Номери дослідів за табл. 2.3.6 при кількості факторів				
	2	3	4	5	6
Перший	1-4	1-8	1-16	1-32	1-64
Другий	65-68,77	65-70,77	65-72,77	65-74,77	65-77

У результаті оброблення результатів одержують одну з трьох моделей, що відповідають даним з *табл. 12.5*, поданих у стовпцях за № 14-16. У першому і другому кроках розглядають моделі за № 14 і № 15, в третьому кроці – модель № 16. Коефіцієнти регресії у вказаних моделях обчислюють за формулами

$$b_p = \frac{\sum y_i x_{pi}}{N}; \quad (12.3)$$

$$b_0 = y; \quad (12.4)$$

$$b_{pk} = \frac{\sum y_i x_{pi} x_{ki}}{N}; \quad (12.5)$$

$$b_p = \frac{\sum y_i x_{pi}}{N} + 2\alpha^2; \quad (12.6)$$

$$b_{pp} = \frac{\sum y_i x_{pi}^2}{N(1 - A^2) + 2(\alpha^2 - a) + (2p - 1)A^2}; \quad (12.7)$$

$$b = y - \sum b_{pp} x_p^2. \quad (12.8)$$

Таблиця 12.8

Стратегія експерименту

№ кроку	№ досліду за табл. 12.6 за кількості факторів					№ формул для оброблення факторів	
	2	3	4	5	6	2	3-6
1	1-4	1,4,6,7	1,4,5,8, 10, 11, 14,15	1,4,5,8, 9,12,13, 16,18, 19,22, 23,26, 27,30,31	1,4,5,8,9, 12,13,16, 17,20,21, 24,25, 28,29,32, 34,35,38, 39,42,43, 46,47,50, 51,54,55, 58,59,62, 63	34-36	
11	65-68, 77	2,3,5,8	1-16	1-32	1-64	34-36	
111	-	65- 70,77	65-72, 77	65-74, 77	65-77	-	36-39

Формули (12.6)–(12.7) використовують тільки для планів другого порядку. У формулах (12.3)–(12.8) прийняті такі позначення:

$$N = 2^p, \quad A = \sqrt{\frac{N}{N + 2p + 1}}, \quad (12.9)$$

де:  $p$  – кількість факторів;  $y_i$  – конкретний результат  $i$ -го досліді.

Використання всіх одержаних моделей допускається тільки в режимі інтраполяції, тобто в межах варіювання факторів.

## 12.2. Використання кореляційно-регресивного аналізу для встановлення залежностей між характеристиками міцності та деформаціями будівельних конструкцій

**Кореляція.** У перекладі означає співвідношення, взаємозалежність. У техніці поняття *кореляція* використовують для вираження кількісного зв'язку між результатом якого-небудь процесу й умовами, в яких він відбувається. Кореляційна залежність не є абсолютно точною. Передбачений за нею результат може відрізнятись від одержаного дослідно. Це зумовлено тим, що в окремому експерименті завжди присутні додаткові умови, які неможливо врахувати через випадкову їх природу. Наприклад, ступінь ущільнення бетонної суміші глибинним вібратором залежить від часу її вібрування в одній точці. Його регулює робітник-бетонник і він залежить не тільки від вказівок проекту виробництва робіт, але й від навиків робітника, досвіду його роботи, ступеня втомленості тощо. Такі умови є типово випадковими і врахувати їх неможливо. Отже, кореляційна залежність лише наближено передбачає результат процесу [128].

**Регресія** – форма кількісного зв'язку прогнозованого результату з умовами, що його визначають. Взагалі використовують рівняння регресії, які є поліномами типу

$$y = b_0 + \sum b_i x_i ; \quad (12.10)$$

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j ; \quad (12.11)$$

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ij} x_i^2 x_j^2 . \quad (12.12)$$

Як і кореляційна залежність, рівняння регресії не є абсолютно точними.

**Метод найменших квадратів.** Використовується в статистиці для складання рівнянь регресії за результатами дослідів. У його основі – складання такого рівняння регресії, під час використання якого сума квадратів відхилень дослідних і вирахованих за рівнянням результатів була б мінімальною. Наприклад, *рис. 12.3* ілюструє результати дослідів встановлення залежності величини  $y$  від деяких значень  $x_i$ .

За кожного значення  $x_i$  виконано два досліди (в експериментальних дослідженнях здійснюють не менше двох експериментів для одержання достовірних результатів). Залежність  $y$  від  $x_i$  можна виразити двома прямими лініями. Для того, щоб оцінити, яка з них достовірніша, треба скласти всі відхилення дослідних результатів від теоретичних, піднесених до квадрата. Для першої лінії сума квадратів відхилень становить



$$\sum \Delta_1^2 = 0,5^2 x_3 = 1,5,$$

а для другої

$$\sum \Delta_2^2 = 0,2^2 x_1 + 0,8^2 x_2 = 0,5^2 x_3 = 1,8.$$

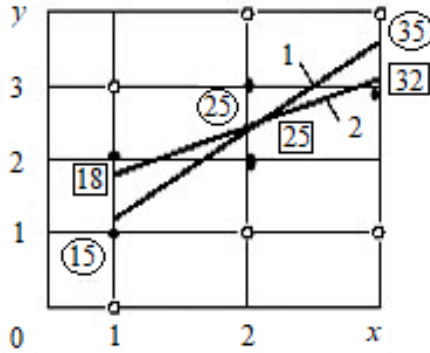


Рис. 12.3. Ілюстрація до терміну «метод найменших квадратів»: 1,2 - лінії регресії; ○ - теоретичні значення  $y$ , одержані з рівняння (12.10); ● - те саме з рівняння (12.11)

Результати обчислень свідчать, що перша лінія достовірніша, оскільки  $\sum \Delta_1^2 < \sum \Delta_2^2$ . Припустимо, що всі точки мають однакову масу, тоді лінія, що описує результати дослідів, була б лінією центра ваги площі, на якій розташовані ці точки.

**Фактор** – одна з умов виконання дослідів. Факторами можуть бути, наприклад, температура, вологість, час, атмосферні опади, опади у вигляді дощу тощо. Всі вони мають бути взаємозалежними, регульованими та істотно впливати на результати дослідів. Позначається буквою  $x_i$ .

**Функція** – результат дослідів. Позначається буквою  $y$ .

**Матриця початкових даних** – таблиця, в якій подані результати й умови виконаних дослідів (табл. 12.9).

Обчислюється за формулою

$$\zeta_{yx} = \frac{\sum y_i x_i - N \cdot \bar{y} \cdot \bar{x}}{\sqrt{(\sum y_i^2 - N \bar{y}^2)(\sum x_i^2 - N \bar{x}^2)}}. \quad (12.13)$$

Наприклад, на рис. 12.3 відтворено результати двох дослідів. Для дослідів першої серії, позначених знаком «●», парний коефіцієнт кореляції обчислюється так (при  $\bar{x} = 2$  і  $\bar{y} = 2,5$ ):

$$\zeta_{yx} = \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 3 \cdot 4 - 6 \cdot 2 - 2 \cdot 2,5}{\sqrt{(1^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2 - 6 \cdot 2^2)(1^2 \cdot 1 + 2^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2 + 4^2 - 6 \cdot 2,5^2)}}.$$

і становить  $\zeta_{yx} = 0,85$ ; для дослідів другої серії, позначених знаком «○», парний коефіцієнт кореляції (при  $\bar{x} = 2$  і  $\bar{y} = 2,17$ )

$$\zeta_{yx} = \frac{1 \cdot 0 + 1 \cdot 3 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 4 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 4 - 2 \cdot 2,17}{\sqrt{(1^2 \cdot 2 + 2^2 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2 - 6 \cdot 2^2)(0^2 + 3^2 + 1^2 \cdot 2 + 4^2 \cdot 2 - 6 \cdot 2,17^2)}}$$

і маємо  $\zeta_{yx} = 0,39$ .

Як бачимо, парний коефіцієнт кореляції у другому випадку менший, ніж у першому. Це відповідає більшій невизначеності залежності у від  $x$  в другому випадку, що підтверджується положенням дослідних точок на *рис. 12.3*.

Таблиця. 12.9

Матриця початкових даних

№ дослідів	Результат дослідів, $y$	Умови виконання дослідів				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_n$
1	$y_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	...	$x_{1n}$
2	$y_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	...	$x_{2n}$
3	$y_3$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	...	$x_{3n}$
...	...	...	...	...	...	...
$n$	$y_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$x_{n3}$	...	$x_{nn}$

**Частинний коефіцієнт кореляції.** У реальній ситуації рідко трапляються випадки, коли результат дослідів залежить тільки від одного чинника. Як правило, експериментатор бере до уваги відразу декілька факторів. Наприклад, міцність бетону залежить не тільки від активності цементу, але й від температури тверднення, тривалості витримки тощо. Тому вплив кожного окремого фактора на результат дослідів треба розглядати разом із впливом інших. Може трапитися, наприклад, що активність цементу не вплинула на міцність бетону в конкретних випадках (хоча відомо, що цей фактор найвпливовіший для міцності). Однак, *частинний коефіцієнт кореляції*, оцінюючи зв'язок між результатом і конкретним фактором, враховує вплив на нього всіх інших факторів і дає змогу об'єктивніше описати залежність, яку розглядають. Обчислюють за формулою

$$\zeta_{yx_j x_1 \dots x_p} = \frac{\zeta_{yx_j x_1 \dots x_{p-1}} - \zeta_{yx_p x_1 \dots x_{p-1}} \cdot \zeta_{yx_p x_1 \dots x_{p-1}}}{\sqrt{(1 - \zeta_{yx_p x_1 \dots x_{p-1}}^2)(1 - \zeta_{yx_j x_1 \dots x_{p-1}}^2)}}. \quad (12.14)$$

**Множинний коефіцієнт кореляції** – показник, який характеризує концентрацію дослідних точок біля  $n$ -мірної площини, що встановлює залежність між результатом дослідження та сукупністю контрольованих факторів. Обчислюється за допомогою парних коефіцієнтів кореляції за формулою

$$R_{yx_1 \dots x_p} = \sqrt{\frac{r_{yx_1 \dots x_{p-1}}^2 + r_{yx_p}^2 - 2r_{yx_1 \dots x_{p-1}} \cdot r_{x_p x_1 \dots x_{p-1}}}{1 - r_{x_p x_1 \dots x_{p-1}}^2}}. \quad (12.15)$$

**Коефіцієнти регресії** – постійні коефіцієнти у рівнянні регресії. Наприклад, у рівнянні (12.10)  $b_1$  і  $b_2$  – коефіцієнти регресії. Геометрично коефіцієнт регресії є тангенс кута нахилу прямої, яка описується рівнянням регресії, до осі відповідного фактора.

**Гіпотеза** – припущення, яке висовується раніше (а ргіогі) – інтуїтивно або за аналогією. Під час статистичного оброблення гіпотезу приймають чи відхиляють з визначеним ступенем достовірності. Наприклад, раніше можна висунути гіпотезу про те, що  $x$  та  $y$  на рис. 12.4 пов'язані лінійною залежністю. Цю гіпотезу можна прийняти чи відхилити з визначеним ступенем достовірності статистичного аналізу. Отже, одне із найважливіших завдань статистики – перевірка гіпотез.

**Вільний член** – постійний коефіцієнт у рівнянні регресії, який не пов'язаний з факторами. У рівняннях (12.10)–(12.12) коефіцієнт  $b_0$  є вільним членом.

**Кінцева дисперсія** – сума квадратів відхилень дослідних результатів від теоретичних. Позначається  $\sigma_{зал}^2$ .

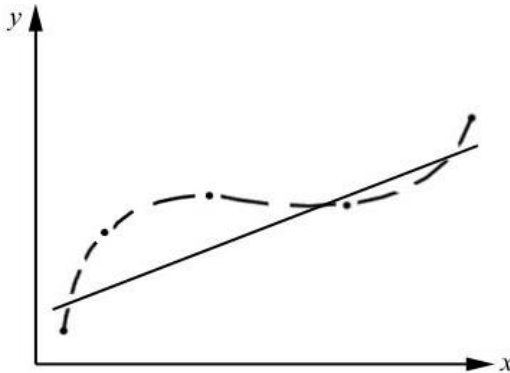


Рис. 12.4. Пояснення до терміну «гіпотеза»

**Ступені свободи** – різниця між фактично дійсною кількістю дослідів та мінімальною необхідною для побудови якої-небудь функ-

ції. Наприклад, для побудови функції, що дається залежністю (12.12), необхідно виконати як мінімум три досліди (тобто мати три дослідні точки). Тому кількість **ступенів свободи** при  $N$  виконаних дослідах буде  $N - 3$ . Зі збільшенням кількості дослідів зростає і кількість **ступенів свободи**. Прийнято, що зі збільшенням кількості дослідів і, відповідно, ступенів свободи, достовірність отримуваної емпіричної функції зростає.

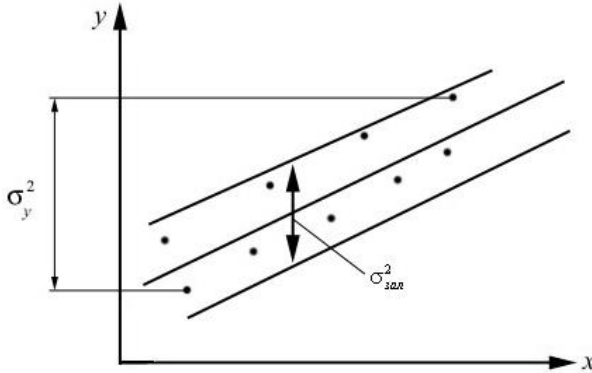


Рис. 12.5. Пояснення до терміну «критерій Фішера»

**Критерій Ст'юдента** (або  $t$ -критерій) – показник, який дає змогу відповідно до заданої достовірності прийняти чи відхилити гіпотезу про існування залежності між випадковими величинами. Використовується для перевірки гіпотези про числові значення **коєфіцієнтів кореляції і регресії**.

**Критерій Фішера** (або  $F$ -критерій) – показник, який дає змогу із заданою вірогідністю прийняти чи відхилити гіпотезу про існування залежності між результатом дослідів і сукупністю регульованих факторів. Використовується для перевірки гіпотези про якість вирівнювання регресій. Вираховується за формулою

$$F = \frac{\sigma^2}{\sigma_{zal}^2}, \quad (12.16)$$

де:  $\sigma^2$  – дисперсія дослідних значень функції відносно середнього значення;  $\sigma_{zal}^2$  – кінцева дисперсія дослідних значень відносно лінії чи поверхні регресії (рис. 12.4).

Значно спрощуючи сенс критерію Фішера, можна відзначити, що він описує відносну похибку рівняння регресії. Зі збільшенням діапазону значень функції у відносна похибка рівняння регресії зменшується.

**Границі довіреної ймовірності** (або довірені інтервали) – границі інтервалу на осі  $x$ , площа якого під кривою теоретичного розподілу відповідає раніше заданій ймовірності (наприклад, 0,75; 0,90; 0,95 іт.д.).

**Алгоритми кореляційно-регресивного аналізу (КРА).** Похідні дані подають у вигляді матриці, яка сформована *табл. 12.9*, причому її форма аналогічна *табл. 12.10*.

Виповнення КРА виконують в такому порядку:

1. Обчислюють середні значення функції і кожного фактора.
2. Обчислюють суми квадратів всіх факторів, похідні всіх пар факторів, а також функції з кожним фактором. Результати обчислень наводять у вигляді *табл. 12.10*, яка симетрична щодо діагоналі. Тому в ній заповнюється тільки права верхня частина.

3. Розраховують суми квадратів відхилень всіх сподівань, поданих у *табл. 12.10*. Результати обчислень наводяться у формі, аналогічній тій самій таблиці; обчислюємо за формулами:

$$\sum \Delta x_p^2 = \sum x_p^2 - N\bar{x}_p^2; \quad (12.17)$$

$$\sum \Delta y^2 = \sum y^2 - N\bar{y}^2; \quad (12.18)$$

$$\sum \Delta x_p x_k = \sum x_p x_k - N\bar{x}_p \bar{x}_k; \quad (12.19)$$

$$\sum \Delta x_p y = \sum x_p y - N\bar{x}_p \bar{y}. \quad (12.20)$$

4. Складають систему рівнянь для визначення коефіцієнтів регресії. Для цього *табл. 12.10* із записаними в ній результатами обчислень за п. 3 дійсного алгоритму заповнюють повністю з урахуванням того, що  $\sum \Delta x_i x_j = \sum \Delta x_j x_i$ . Далі в кожній клітинці першого стовпця до записаної суми квадратів відхилень як співмножник дописують шуканий коефіцієнт регресії  $b_j$ . Те саме повторюють у всіх інших стовпцях, причому кожному стовпцю відповідає свій індекс при коефіцієнті регресії. Далі утворюють окремі рівняння за рядками, вставляючи знак «+» між усіма сумами і знак « $\Rightarrow$ » – перед останньою сумою (поєднанням  $x$  та  $y$ ). Невідомими є коефіцієнти регресії  $b_j$  (*табл. 12.11*).

Розв'язком одержаної системи рівнянь визначаються всі шукані значення коефіцієнтів регресії.

5. Одержують вільний член рівняння регресії за формулою

$$b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^p b_i \bar{x}_i. \quad (12.21)$$

6. Визначають значення  $t$ -критеріїв для кожного коефіцієнта за формулами

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{\sqrt{\sigma_{\text{зал}}^2 |c_{ij}|}}; \quad (12.22)$$

$$\sigma_{\text{заг}}^2 = \frac{1}{N - p - 1} \sum (y - \tilde{y}_i)^2, \quad (12.23)$$

де:  $N$  – кількість дослідів;  $p$  – кількість факторів;  $y_i$  – дослідні значення функції;  $\tilde{y}_i$  – обчислені за рівнянням регресії;  $c_{ij}$  – допоміжний елемент.

Таблиця 12.10

Матриця сум добутоків

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	...	$x_p$	$y$
$x_1$	$\Sigma x_{1i}^2$	$\Sigma x_{1i} x_{2i}$	$\Sigma x_{1i} x_{3i}$	$\Sigma x_{1i} x_{4i}$	...	$\Sigma x_{1i} x_{pi}$	$\Sigma x_{1i} y_i$
$x_2$		$\Sigma x_{2i}^2$	$\Sigma x_{2i} x_{3i}$	$\Sigma x_{2i} x_{4i}$	...	$\Sigma x_{2i} x_{pi}$	$\Sigma x_{2i} y_i$
$x_3$			$\Sigma x_{3i}^2$	$\Sigma x_{3i} x_{4i}$	...	$\Sigma x_{3i} x_{pi}$	$\Sigma x_{3i} y_i$
$x_4$				$\Sigma x_{4i}^2$	...	$\Sigma x_{4i} x_{pi}$	$\Sigma x_{4i} y_i$
...					...		
$x_p$						$\Sigma x_{pi}^2$	$\Sigma x_{pi} y_i$
$y$							$\Sigma y_i^2$

7. Допоміжний елемент  $c_{ij}$  розраховують для кожного коефіцієнта регресії. Для цього складається система рівнянь, аналогічна заданій у табл. 12.11. У цій таблиці замість коефіцієнтів регресії  $b_j$ , проставляють допоміжні елементи  $c_{ij}$ . Праві частини рівнянь прирівнюють до нуля, за винятком того рядка, який відповідає номеру коефіцієнта регресії. У цьому рівнянні права частина прирівнюється до одиниці. Розв'язуючи системи рівнянь, визначають значення допоміжного елемента. Наприклад, для другого коефіцієнта регресії  $b_2$  система рівнянь буде така:

$$\begin{aligned} c_{21} \Sigma \Delta x_1^2 + c_{22} \Sigma \Delta x_1 x_2 + \dots + c_{2p} \Sigma \Delta x_1 x_p &= 0; \\ c_{21} \Sigma \Delta x_2 x_1 + c_{22} \Sigma \Delta x_2^2 + \dots + c_{2p} \Sigma \Delta x_2 x_p &= 1; \\ c_{21} \Sigma \Delta x_p x_1 + c_{22} \Sigma \Delta x_p x_2 + \dots + c_{2p} \Sigma \Delta x_p^2 &= 0. \end{aligned} \quad (12.24)$$

8. Одержані дослідні дані  $t$ -критеріїв порівнюють з табличними значеннями при числі ступенів свободи на один менше, ніж кількість дослідів при заданому ступені достовірності. Якщо дослідні значення  $t$ -критеріїв перевищують табличні, то коефіцієнт ре-



$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (12.25)$$

де:  $m_i$  – числове значення (частота) у  $i$ -му інтервалі (розряді);  $p_i$  – теоретичне значення відповідності в  $i$ -му інтервалі;  $n$  – загальна кількість спостережень.

Для зручності обчислень і графічної побудови густини розподілу неперервних випадкових величин перетворимо формулу (12.25) так:

$$\chi^2 = n \sum_N \frac{[p_N^* f(t_N)]^{h_N}}{f(t_N)}, \quad (12.26)$$

де:  $p_N^*$  і  $f(t_N)$  – відповідно емпірична і теоретична вірогідності;  $t_N$  – середня швидкість  $N$ -го інтервалу для неперервної випадкової величини або можливі значення для дискретної;  $h_N$  – ширина (довжина)  $N$ -го інтервалу (для дискретної  $h_N = 1$ ).

Під час розрахунків можна використовувати формули (12.25) або (12.26). Розв'язуючи конкретні приклади доцільніше застосовувати формулу (12.26), але потрібно віддзначити, що значення емпіричної і теоретичної ймовірностей  $p_N^*$  і  $f(t_N)$  для неперервних випадкових величин зараховані до ширини інтервалу, який дорівнює одиниці. Оскільки ймовірність попадання строго в одну точку дорівнює нулю, то точку можна розглядати як інтервал як завгодно малої ширини.

2. Визначають число показника (ступінь свободи  $r$  різницю між числом інтервалів  $k$  і накладених зв'язків (умов))  $S^*$ :

$$r = k - S^*. \quad (12.27)$$

Оскільки під час побудови законів розподілу накладається вимога  $\sum p_N^* = 1$ , тобто будь-коли є тільки один зв'язок (умова), вводячи заміну  $S = S^* - 1$ , одержимо:

$$r = k - S - 1. \quad (12.28)$$

де  $S$  – кількість числових характеристик (параметрів) закону розподілу.

Наприклад, нормальний закон є двопараметричним і визначається математичним очікуванням і середнім квадратичним відхиленням, тобто  $S = 2$ . Для розв'язання можна використовувати формулу (12.27).

За значеннями  $r$  і  $\chi^2$  за допомогою таблиці визначають ймовірність узгодження  $p$  теоретичного і статистичного розподілів. Якщо ймовірність  $p$  буде більша за 0,05, то статистичний розподіл узгоджується з теоретичним. У протилежному випадку ( $p < 0,05$ ) вказані розповсюдження будуть не випадковими, а визначений тео-



ретичний закон розподілу відкидається. Тому для опису статистичних даних необхідно шукати вдаліший закон.

**Критерій узгодження Колмогорова.** Обчислювальна схема використання критерію узгодження Колмогорова об'єднує декілька етапів. Цей критерій є також доволі розповсюдженим у практиці статистичних досліджень.

1. Визначаємо емпіричне і теоретичне значення функції розподілу  $F^*(t)$  і  $F(t)$ .

2. Обчислюємо абсолютні значення різниці між теоретичною і емпіричною функціями розподілу за однакових значень аргументу, а потім вибираємо найбільше

$$k_0 = \max |F(t_N) - F^*(t_N)|. \quad (12.29)$$

3. Обчислюємо

$$\lambda = k_0 \sqrt{n}. \quad (12.30)$$

4. Визначаємо ймовірність узгодження  $p(\lambda)$  теоретичного й емпіричного розподілів за даними таблиці для визначеного  $\lambda$ . Якщо  $p > 0,05$ , то узгодження задовільне.

Критерій Колмогорова відрізняється від  $\chi^2$  своєю простотою, однак, дає завищені значення ймовірності  $p(\lambda)$ . Його необхідно використовувати тільки тоді, коли закон розподілу відомий.

**Критерій узгодженості Фішера** – порівняння дисперсій двох нормально розподілених генеральних сукупностей. Нехай за незалежними вибірками об'ємів  $n_1$  та  $n_2$ , зробленими із нормально розподілених генеральних сукупностей, обчислені виправлені вибіркові дисперсії  $\sigma_\xi^2$  і  $\sigma_\eta^2$ .

При заданому рівні значущості  $\alpha$  перевіряють нульову гіпотезу  $H_0 : D\xi = D\eta$  про рівність дисперсій двох нормально розподілених генеральних сукупностей за схемою:

1. Обчислюють спостережуване значення критерію як відношення більшої виправленої дисперсії  $\sigma_b^2$  до меншої  $\sigma_m^2$ :

$$F_{емп} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_m^2}.$$

2. а) Альтернативна гіпотеза  $H_0 : D\xi > D\eta$ .

З таблиці критичних точок розподілу (табл. 12.12) Фішера-Снедекора за рівнем значущості  $\alpha$  і числами ступенів вільності

$k_1 = n_1 - 1$  і  $k_2 = n_2 - 1$  ( $n_1$  – об’єм вибірки, виправлена дисперсія якої більша) одержують критичну точку розподілу  $F_{кр} \left( \frac{\alpha}{2}; k_1; k_2 \right)$ .

Таблиця 12.12

Значення критерію Фішера за рівня значимості 0,95

$\nu_1$	Значення величини функції розподілу $F$ при $\nu_2$						
	1	5	10	20	50	200	$\infty$
1	161	230	242	248	252	254	254
5	6,61	5,05	4,74	4,56	4,44	4,39	4,36
10	4,96	3,33	2,98	2,77	2,64	2,56	2,54
20	4,35	2,71	2,35	2,12	1,97	1,88	1,84
50	4,03	2,40	2,03	1,78	1,60	1,48	1,44
200	3,89	2,26	1,88	1,62	1,41	1,26	1,19
$\infty$	3,84	2,21	1,83	1,57	1,35	1,17	1,00

Якщо  $F_{емп} < F_{кр}$  – нульову гіпотезу приймають; якщо  $F_{емп} > F_{кр}$  – нульову гіпотезу відхиляють.

б) Альтернативна гіпотеза  $H_1 : D\xi \neq D\eta$ . З таблиці критичних точок розподілу Фішера-Снедекора за рівнем значущості  $\alpha$  і числами ступенів вільності  $k_1 = n_1 - 1$  і  $k_2 = n_2 - 1$  ( $n_1$  -об’єм вибірки, виправлена дисперсія якої більша) одержують критичну точку розподілу  $F_{кр} \left( \frac{\alpha}{2}; k_1; k_2 \right)$ .

Якщо  $F_{емп} < F_{кр}$  – нульову гіпотезу приймають; якщо  $F_{емп} > F_{кр}$  – нульову гіпотезу відхиляють.

**Критерій узгодженості Стьюдента** – порівняння математичних сподівань двох нормально розподілених генеральних сукупностей, невідомі дисперсії яких однакові (малі незалежні вибірки). Нехай із двох нормально розподілених генеральних сукупностей, дисперсії яких невідомі, зроблено вибірки малих об’ємів. У цьому випадку не можна отримати хороших оцінок дисперсії, тому застосувати критерій з попереднього пункту не можна.

Але, якщо припустити, що невідомі дисперсії однакові, то можна побудувати критерій Стьюдента порівняння середніх

$$t = \frac{\bar{x}_e - \bar{y}_e}{\sqrt{(n-1)\sigma_\xi^2 + (m-1)\sigma_\eta^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}}$$

Випадкова величина  $t$  у разі справедливості нульової гіпотези  $H_0 : M\xi = M\eta$  має розподіл Стьюдента з  $k = n + m - 2$  ступенями вільності. Критична область визначається альтернативною гіпотезою.

Якщо невідомо чи дисперсії однакові, то перш, ніж порівнювати математичні сподівання, потрібно за критерієм Фішера-Снедекора попередньо перевірити гіпотезу про рівність дисперсій. У разі заданого рівня значущості  $\alpha$  перевірку нульової гіпотези  $H_0 : M\xi = M\eta$  про рівність математичних сподівань двох нормально розподілених сукупностей з невідомими, але однаковими дисперсіями за малими незалежними вибірками виконують за схемою:

1. Одним із методів обчислюють вибіркові середні  $\bar{x}_e, \bar{y}_e$  і виправлені дисперсії  $\sigma_\xi^2$  і  $\sigma_\eta^2$ .

2. Обчислюють спостережуване значення критерію

$$t_{emn} = \frac{\bar{x}_e - \bar{y}_e}{\sqrt{(n-1)\sigma_\xi^2 + (m-1)\sigma_\eta^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}}$$

3. а) Альтернативна гіпотеза  $H_1 : M\xi \neq M\eta$ . З таблиці критичних точок розподілу (табл. 12.13) Стьюдента за рівнем значущості  $\tilde{\alpha}$  (двостороння критична область) і числом ступенів вільності  $k = n + m - 2$  одержують критичну точку  $t_{e\tilde{\alpha}}(\tilde{\alpha}; k)$ . Якщо  $|t_{emn}| < t_{kp}$  – нульову гіпотезу приймають, якщо  $|t_{emn}| > t_{kp}$  – нульову гіпотезу відкидають.

Таблиця 12.13

Значення критерію Стьюдента

Число ступенів вільності	Величина $t$ за рівня значимості $\alpha$					
	0,10	0,05	0,02	0,01	0,002	0,001
1	6,31	12,7	31,82	63,7	318,3	637,0
5	2,01	2,57	3,37	4,03	5,89	6,86
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,14	4,59
15	1,75	2,13	2,60	2,95	3,73	4,07
20	1,73	2,09	2,53	2,85	3,55	3,85
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,45	3,72
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,23	3,46
$\infty$	1,64	1,96	2,33	2,58	3,09	3,29

б) Альтернативна гіпотеза  $H_1 : M\xi > M\eta$ .

З таблиці критичних точок розподілу Стьюдента за рівнем значущості  $\alpha$  (одностороння критична область) і числом ступенів вільності  $k = n + m - 2$  одержують критичну точку правосторонньої критичної області  $t_{кр}(\alpha; k)$ . Якщо  $t_{емн} < t_{кр}$  – нульову гіпотезу приймають, якщо  $t_{емн} > t_{кр}$  – нульову гіпотезу відкидають.

в) Альтернативна гіпотеза  $H_1 : M\xi < M\eta$ . Обчислюємо критичну точку як це описано в пункті б). Якщо  $t_{емн} > -t_{кр}$  – нульову гіпотезу приймають, якщо  $t_{емн} < -t_{кр}$  – нульову гіпотезу відкидають.

## 12.4. Висновки до розділу 12

На основі багаторічних досліджень будівельних конструкцій і споруд та наведених результатів використання теоретичних законів розподілу випадкових величин у попередньому розділі. У цьому розділі вони склали підстави доведення теорії математичного планування експерименті, а теорія дала імпульс та створила інструмент для використання кореляційно-регресивного аналізу для встановлення залежностей між характеристиками міцності та деформаціями будівельних конструкцій. Ці важливі результати вдалось підсумувати в таких висновках:

1. На підставі законів розподілу наведених у розділі 11 в якому сформульовано основні поняття теорії математичного планування експерименту. Зокрема, наведено загальні відомості про планування експерименту, принципи кодування факторів, сформульовано і наведено побудову регресивних рівнянь, умови та результати проведення дослідів, умовне зображення трифакторного експерименту та матриця планування для дробної репліки експерименту.

2. Створено методика планування експерименту, яка передбачає планування експерименту в два етапи: на першому етапі проведення відсікаючих експериментів та покрокове дослідження за певними факторами планами або дробними репліками моделлю погоджують фактори які до неї входять. Далі детально описано планування експерименту. Зокрема, наведено план відсіюючих експериментів, типовий план експерименту, об'єм експерименту залежить від кількості факторів та план стратегії експерименту. Наведено формули для визначення коефіцієнтів регресії в моделях (14)-(15).

3. Щоб встановити як впливає той чи інший фактор на міцність матеріалу чи конструкції необхідно використання кореляційно-регресивного аналізу для встановлення залежностей між харак-

теристиками міцності та деформаціями будівельних конструкцій. Представлено термінологію КРА, що таке: кореляція, регресія, метод найменших квадратів, фактор, функція, матриця початкових даних, частинний коефіцієнт кореляції, множинний коефіцієнт кореляції, коефіцієнт регресії, гіпотеза, вільний член, кінцева дисперсія, степені свободи, критерій Стюдента, критерій Фішера, границі довіреної ймовірності, алгоритми кореляційно-регресивний аналіз (КРА), який проводиться в певному порядку наведеному у розділі.

4. Критерії узгодженості найчастіше, які використовуються при математичному плануванні експерименту та при оцінці методів дослідження теорії ймовірності також математичної статистики такі: критерій узгодженості Пірсона, критерій узгодженості Колмогорова, критерій узгодженості Фішера та критерій узгодженості Стюдента для яких наведено конкретні залежності та алгоритми використання.

## 13. МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ

### 13.1. Суть методів моделювання й галузь їх використання

Під час розв'язування конкретних задач, які виникають у різних додатках з потреб практики (вибір конструктивних параметрів, матеріалів, конструкцій, обґрунтування раціональної організації виробничих процесів або ремонтного виробництва), аналітичний їх розв'язок через значні математичні труднощі практично неможливий, а експериментальні дослідження і натурні випробування вимагають значних витрат часу, знаряддя тощо. У зв'язку з цим використовують методи моделювання наукових складних систем, явищ або об'єктів [73, 124, 127, 193, 222]. Складною системою може бути конструкція будівлі, споруди, моста, система регулювання й управління виробничими процесами, організація технічного обслуговування унікальних споруд (мостів, стадіонів тощо). Під моделюванням розуміють предмет вивчення системи (моделі) її заміною для експериментального дослідження зручнішою формою, яка зберігає найістотніші риси оригіналу і дозволяє вивчати моделі методом проб.

Найбільш широко розповсюджені такі моделі:

– *функціональні*, які описують функції, що виконують основні складові частини системи і розробляються у вигляді технологічних схем або рівнянь для загального уявлення про процес і результат його перебігу;

– *економічні*, які визначають залежність показника, що досліджується (максимальний прибуток, мінімум витрат), від економічних факторів і подаються у вигляді рівнянь і залежностей, зручних для моделювання;

– *інформаційні процедурні*, які визначають зміст, формат і швидкість (*частоту*) потоку інформації.

Інформаційні моделі охоплюють також контроль і перевірку інформації, облік і звітність, одержання дозволу на подання деяких видів інформації, заходи захисту проти втрати інформації в аварійних випадках і порядок роботи під час її використання. Для складання моделей використовують розмовний і математичний описи, креслення, криві, таблиці і номограми, логічні блок-схеми з вказівкою порядку дій, якщо виникне та чи інша ситуація.

Розрізняють два основні види моделей:

– *детермінована* – це аналітичне зображення закономірності системи, коли для заданої множини вхідних значень одержують на

виході тільки один результат. Тобто детермінованою моделлю є диференціальне рівняння, а як вхідні значення прийняті параметри, що входять у нього (конкретні значення геометричних параметрів конструкції, профілю і конструктивних параметрів плити). Єдиним результатом вирішення цієї проблеми є міцність конструкції;

– *недетермінована* (ймовірнісна) модель, або стохастична – це така модель, в якій функціонування окремих її елементів або вхідні значення залежать від випадкових параметрів, тобто описуються законами розподілу випадкових величин. Результат її функціонування можна передбачити тільки в ймовірнісному сенсі, тобто він є середнім значенням (математичним очікуванням) або законом розподілу.

Якщо для моделювання надійності моста як вхідні дані використати закони розподілу окремих елементів – гідроізоляція, дорожнє покриття прогонової будови, стояни, опори, фундаменти, то його надійність описуватиметься стохастичною моделлю, яка залежить від дискретних етапів (надійності) окремих елементів моста. У цьому розділі розглянуті переважно функціональні стохастичні моделі.

Отже, методи побудови й апробації різних моделей є основою моделювання. За допомогою моделювання можна отримати відповіді на запитання, які постають на етапі попереднього проектування, розробки, випробування системи, а також під час її експлуатації. Коли модель достатньо достовірно описує цю систему стосовно задач, які вона розв'язує, і результатів, що отримуються, то в таких випадках моделювання – недорогий, ефективний і оперативний метод аналізу системи і оцінювання її функціонування [124].

**Технічне моделювання** використовують під час вибору конструкцій споруди, воно дає змогу виявити недоліки існуючих рішень або під час проектування знайти шляхи їх усунення. Його застосовують при створенні нових видів конструктивних елементів споруд, що дозволяє під час проектування удосконалювати споруди та об'єкти, ще не досліджені на практиці конструкції. У технічному виконанні – це, як правило, спрощена модель конструкції, зменшена в декілька разів, де як математичний апарат використовують теорію подібності, яка дає змогу виявлені в одного об'єкта (споруди) ознаки перенести на інший, тобто умови правомірності розумових висновків за аналогією. Технічне моделювання у зв'язку зі складністю конструктивного використання моделей і реальних умов їх роботи значно поступається математичному, котре більш гнучке, ефективне і перспективне.

Від усіх моделей *математичні* відрізняються тим, що пред-

метом в їх основі є формально-логічний апарат математики. Звідси найважливіша перевага – можливість кількісного аналізу за допомогою сучасних математичних методів. Важливою перевагою математичних моделей є універсальність мови математики, можливість використання одних і тих самих моделей для дослідження різних систем. За допомогою математичних моделей можна отримати результати, які належать не до окремої конкретної реалізації, яка відповідає визначеним початковим даним і фіксованим значенням параметрів системи, що використовується, а до множини можливої поведінки системи [124, 125].

Модель або сукупність моделей, які описують це явище або систему, разом із предметами аналізу їх поведінки утворюють імітаційну (моделюючу) систему. Прикладом такої системи, яка дозволяє визначати основні результуючі показники конструкції (споруди), може бути комплекс, який складається із рівнянь, що описують напружено-деформований стан елементів споруди, і фактори, які впливають на неї під час експлуатації (агресивне середовище, температура, старіння матеріалів, текучість, повзучість тощо). Однак для більшості математичних моделей, які описують сучасні складні системи, одержати аналітичні результати практично дуже важко. Тому застосовують ймовірнісно-стохастичні методи й алгоритми числового аналізу, що обумовлює широке використання персональних комп'ютерів (ПК).

Отже, можна створювати математично-імітаційні або моделювальні системи, які дозволяють використовувати електронно-обчислювальні засоби. **Моделювання на ПК** – це різновид математичного, що має низку переваг над іншими методами досліджень (універсальність, гнучкість, економічність) і дозволяє вирішити одну із основних проблем сучасної науки – проблему складності. Метод моделювання з використанням ПК має такі переваги [128, 156]:

1. На етапах задуму і попереднього проектування системи (споруди) можна завчасно визначити успішність функціонування системи, що виключає непотрібні затрати людських і матеріальних ресурсів на побудову нераціональних систем. Відповісти на багато запитань, які виникають під час функціонування системи, можна без дорогого методу створення реальної системи і її апробації.

2. Дає змогу дослідити особливості функціонування системи у будь-яких можливих умовах. При цьому, параметри системи і навколишнього середовища можна вживати для будь-яких обставин, зокрема і таких, які не реалізуються в натурних дослідах, що дозво-



ляє зменшити потребу у складному лабораторному обладнанні і в експлуатаційних випробуваннях системи.

3. Застосування ПК – нерідко єдиний спосіб розв’язання задач, які неможливо виконати за допомогою лабораторних, натурних експериментів або аналітичних методів. Тривалість випробувань системи скорочується до хвилин, тоді як в реальних умовах потрібно декілька днів або місяців.

4. Необхідну інформацію, яка відображає реальні умови, можливо швидко і в потрібних кількостях отримати штучно із врахуванням ймовірності природи їх елементів, використовуючи, наприклад, метод Монте-Карло.

5. Модель, побудована за допомогою методу Монте-Карло і ПК, дуже гнучка і дозволяє відтворювати будь-які реальні та гіпотетичні ситуації, а також враховувати всі можливі обмеження, що робить її достатньо універсальною.

Моделювання за допомогою ПК є потужним інструментом дослідження, однак, багато задач можна розв’язати ефективніше – методами теорії масового обслуговування. Правильне їх використання можливе тільки за чіткого розуміння суті умов застосування. Основні критерії використання методу моделювання з ПК такі:

- неможливість або відсутність аналітичних методів розв’язання задачі;

- повна впевненість в успішному створенні моделі, яка достатньо добре реалізує особливості функціонування досліджуваної системи;

- великий обсяг обчислень, який вимагає ПК, оскільки виконати його вручну неможливо;

- непридатність інших методів;

- неможливість використання процесу побудови моделі для дослідження системи, що моделюється, та її поведінки.

Сфера використання ПК для моделювання дуже широка й особливо доцільна там, де відбуваються різні імітації.

Прикладами використання моделювання в будівництві і на шляхах сполучення можуть бути: а) вивчення й аналіз надійності мостів, шляхопроводів, підземних споруд; б) вибір найбільш надійних автодорожніх і залізничних шляхів сполучення; в) вибір конструктивних параметрів моста, споруди, профілю дорожнього полотна тощо.

Моделювання здійснюють в три етапи. На першому вивчають комплексність проблеми, він передбачає:

- виділення задачі, розв’язання якої доцільно сполучити з дослі-

дженням методами математичного моделювання;

– формулювання запитань, на які потрібно відповісти після моделювання;

– вибір одиниці довжини тимчасового інтервалу моделювання для прояву всіх характерних ознак цього явища;

– формулювання обмежень на систему, яка розглядається, з визначенням кількості параметрів, які входять у модель;

– побудова легкооглядового зображення структури системи, яка моделюється.

Перший етап дає змогу чітко зрозуміти поставлену задачу, виявити прогалини у знаннях про систему і висунути ті або інші гіпотези. Другий етап полягає у формалізації і поданні у вигляді математичних співвідношень між параметрами, які описують поведінку системи. На третьому апробують модель і аналізують результати. Найцікавішими є функціональні *стохастичні моделі*, які розглядаються для моделювання будівель, мостів, споруд, доріг у різних умовах експлуатації.

### **13.2. Метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло)**

Під час проектування і конструювання, випробувань і експлуатації будівель, споруд виникає багато задач, які вимагають знання кількісних і якісних закономірностей, властивих процесу старіння матеріалів у різних умовах, які можна розглядати як складну систему управління [9, 128, 156, 212].

Класичні методи математики не завжди придатні для дослідження складних систем, тому в останні роки широко розповсюджені різні види моделювання, зокрема метод статистичного моделювання, що реалізується на ПК (метод Монте-Карло). Він дає змогу розв'язувати дуже складні задачі, має істотні переваги порівняно з аналітичними методами й іншими видами моделювання і часто є єдиним практично доступним методом дослідження, особливо на стадії проектування. Варто зауважити, що витрати робочого часу і матеріальних цінностей на реалізацію статистичних моделей незначні проти витрат на натурний нагляд. Водночас результати статистичного моделювання дуже близькі до даних натурального нагляду. Під час вивчення будь-якого процесу методом моделювання необхідно насамперед побудувати математичний опис або математичну модель процесу, який вивчають, і визначити величини, які характеризують його кількісно. Математична модель є результатом форма-

лізації процесу, тобто побудови чіткого формального (математичного) його опису з необхідним ступенем наближення до дійсного. Наприклад, побудова математичної моделі, яка імітує профіль дороги, зводиться до одержання співвідношень, які описують цей профіль як складну систему, на вхід якої подаються величини, що характеризують дорогу (нахил, ширина, довжина, радіуси повороту тощо), а в результаті реакції системи, тобто відповідним керуванням джерелом механічної енергії, отримуємо основні показники профілю. Оскільки модель, яка реалізується за допомогою методу Монте-Карло, стохастична, то для математичного опису окремих явищ процесу необхідно одержати й узагальнити статистичні (експериментальні) дані і подати їх у зручній для обчислення формі.

Розглянемо процес руху автомобіля в різних дорожніх умовах, які характеризуються геометричними елементами повздожнього профілю, тобто нахилами і довжинами.

Існуючі аналітичні методи розрахунку моста (споруди), які містять детерміновані моделі, навіть з використанням ПК не враховують роботу самих конструкцій моста та його взаємозв'язок з основою, що є істотним недоліком, оскільки не вдається достатньо точно відтворити роботу конструкцій моста за будь-яких умов. Тоді застосовують метод Монте-Карло, який вимагає ймовірнісних характеристик про розподіл часу роботи споруди в різних діапазонах тривалої експлуатації. Тут раціональніше зобразити дорожні умови експлуатації у вигляді кривих розподілу, оскільки методи теорії ймовірності і математичної статистики дозволяють визначити числові характеристики цих розподілів для типових мостів чи автомобільних доріг з твердим покриттям. Отже, для побудови математичної моделі необхідно мати аналітичні вирази, які описують проектування будівництва та експлуатацію моста, рух автомобіля тощо, і отримати методами математичної статистики широкі дані, побудувати криві розподілу ймовірних відмов того чи іншого елемента моста (споруди) в типових дорожніх умовах, що характеризуються розподілом часу його роботи. Моделювання проектування будівництва та експлуатації моста чи іншої споруди полягає у відтворенні за допомогою методу Монте-Карло на ПК ізометричних елементів моста, споруди, профілю дороги тощо, тобто побудові моделі моста, споруди за кривими розподілу. Зауважимо, що цей метод як вихідні рівняння використовує закон розподілу випадкових величин, які одержують за допомогою методів теорії ймовірності і математичної статистики. Для моделювання стохастичної моделі за методом Монте-Карло необхідно достатньо економно буду-

вати послідовність чисел, які відповідають визначеним законам розподілу. Для цього використовують декілька способів [128].

Проілюструємо основну ідею методу Монте-Карло на **прикладі**. Для раціональної організації заправки потрібно визначити середній час  $T_{сер}$  очікування автомобіля біля бензоколонки. Звичайно це роблять декількома методами. Виконують хронометричні спостереження часу очікування всіх автомобілів і обчислюють середнє арифметичне  $T_{сер}$ .

1. Визначають закон розподілу часових інтервалів прибуття всіх автомобілів на заправку  $f_1(t)$  і тривалості цих заправок  $f_2(t)$ . Якщо ці розподілення підпорядковуються експоненційному закону, то, використавши математичний апарат теорії масового обслуговування, обчислюють середній час очікування заправки.
2. Застосовують метод Монте-Карло. Для цього попередньо виконують статистичне спостереження і визначають значення параметрів розподілу  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ . Далі обслуговувальну систему визначення  $T_{сер}$  розбивають на два етапи:
  - моделюють на ПК за  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  отримані  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) і  $t_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) випадкові числа, які показують час прибуття автомобіля на заправку і час заправки;
  - визначають на ПК з використанням логічних і арифметичних операцій і набору значень  $t_i$  і  $t_j$  для заданого часу доби  $T_{сер}$ .

Перевага методу Монте-Карло в тому, що не завжди вдається використати апарат теорії масового обслуговування і дорогий експеримент для складніших моделей. Окрім того, моделі, побудовані за цим методом, дозволяють варіювати значеннями параметрів будь-яких законів  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  і дослідити процес для ситуацій, які можуть виникнути.

### 13.3. Основні етапи побудови моделі та формування її задуму

**Основні етапи побудови.** Моделювання за допомогою ПК є ефективним методом аналізу та розрахунку складних систем до початку проектування, на етапі проектування, а також після його завершення і впровадження системи. Більшість моделей, побудованих із врахуванням ймовірнісних характеристик системи, загалом є комбінацією детермінованих розрахунків і методу Монте-Карло. Під час побудови моделі доцільно виділити три основних етапи формулю-

вання її задуму: реалізація; отримання й аналіз результатів моделювання. Основний перелік питань, які складають етапи побудови моделі, є загальноприйнятими (рис. 13.1). Однак для деяких моделей можна додавати інші питання або змінювати їх послідовність.

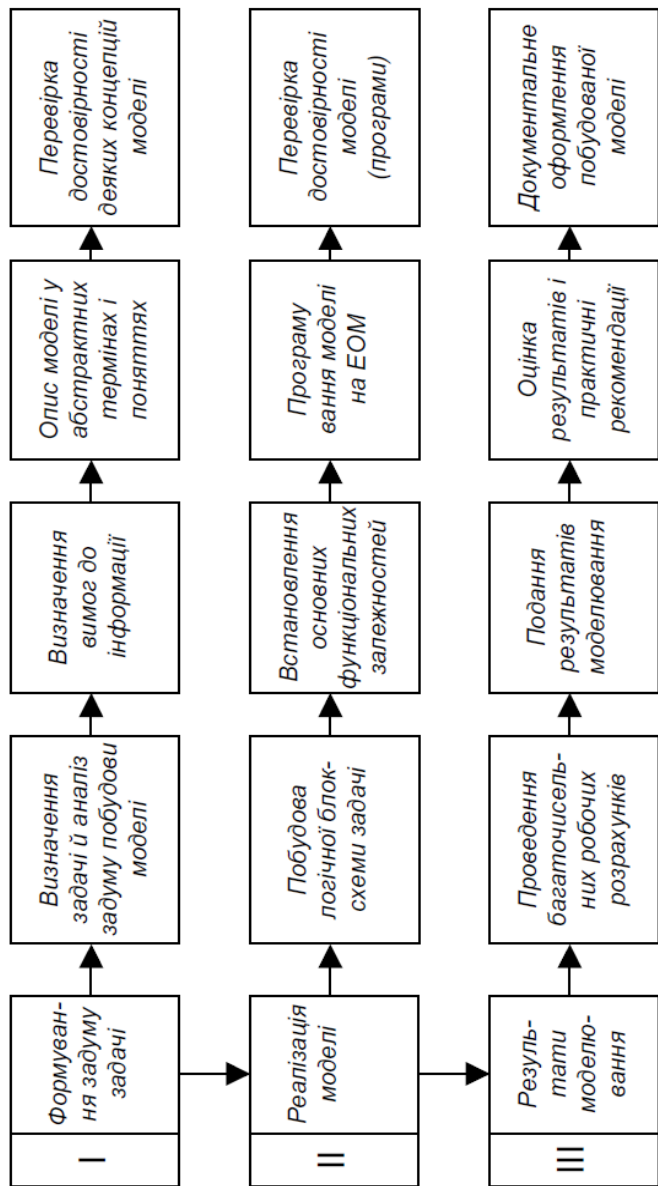


Рис. 13.1. Основні етапи моделювання

**Формулювання задуму моделі.** На першому етапі побудови моделі, яка вимагає 20-30% всіх зусиль, досконало визначають задачу і чітко її формулюють. Далі необхідно встановити критерій

ефективності, а також вирішити питання щодо масштабів людських і фінансових ресурсів, розбити задачу на низку підзадач з визначенням послідовності їх розв'язання. У формулюванні задачі вказують її існування; перелік питань; масштаб задачі; підзадачі і послідовність їх розв'язання; можливі методи розв'язання або ті, які допускаються; обґрунтування робочої сили, програмування на ПК. Однак потрібно завжди бути готовим до перегляду формулювання, щоб впевнитись у правильності прийнятих вирішень.

На етапі побудови моделі виконують ретельний аналіз, який полягає у виборі і визначенні параметрів і змінних системи; визначають критерії ефективності; вибирають апроксимувальні залежності; аналізують етап реалізації і галузь застосування результатів моделювання. Після усвідомлення задачі необхідно сформулювати вимоги до інформації. Під інформацією розуміють якісні та кількісні вихідні дані для її розв'язку.

Слід вияснити, яку інформацію можна вважати потрібною, де її одержати і якими методами обробляти. Для цього вивчають літературу; складають бібліографічні довідки; аналізують джерела інформації; документи і звіти; готують апаратні або аналізують експериментальні дані; консультуються зі спеціалістами й експертами. Опис і позначення моделі в абстрактних термінах і поняттях охоплює математичний опис; вихідні припущення і пропозиції; обґрунтування основного методу побудови моделі; визначення й опис параметрів і змінних системи з вказівкою їх детермінованої або стохастичної природи; обґрунтування критеріїв ефективності. Після того, як концептуальна модель визначена, описана і встановлена доцільність її створення, необхідно, перш ніж перейти до наступного етапу, переконатись у достовірності окремих її концепцій. Така перевірка достатньо складна і тут можна використати числові розрахунки.

Отже, на етапі формулювання задуму визначається і формалізується проект моделі і загальний план її реалізації, обґрунтовується доцільність її побудови, описуються параметри, а також галузі їх застосування.

### **13.4. Реалізація моделі та результати моделювання**

Другий етап (*рис. 13.1*), який вимагає 40–50% всіх зусиль під час створення моделі, – це етап практичної діяльності, коли реально втілюються ідеї та задуми. Загальний задум моделі відображається у вигляді логічної блок-схеми. Пропонують будувати модель за модульним принципом, тобто у вигляді сукупності стандартних бло-

ків-модулів, кожний із яких реалізує певну процедуру або функцію. Відрізняють основні та допоміжні модулі. Основний – це частини системи (наприклад, блок визначення швидкості зростання тріщини в залізобетонних балках моста), а допоміжний – складова частина модуля. Допоміжні модулі не відтворюють властивості системи і їх можна використати в інших моделях, наприклад, блок одержання псевдовипадкових рівномірно розподілених випадкових чисел. Реалізувати кожний блок на ПК можливо складанням програми в кодах ПК або з допомогою алгоритмічної мови. Одночасно або до реалізації логічної блок-схеми потрібно встановити математичні рівняння у вигляді явних функцій, або подати співвідношення, які маємо, у вигляді таблиць. Як математичний апарат можна використовувати методи математичної статистики і регресивного аналізу [128, 156].

Після складання логічної блок-схеми і до початку програмування необхідно визначити достовірність моделі, тобто встановити: чи дозволяє задум моделі розв'язати поставлену задачу; чи точно він відображений у логічній блок-схемі; чи повна запропонована блок-схема і чи володіє необхідною послідовністю; чи правильні математичні рівняння, які використовуємо.

Отримавши стверджувальні відповіді, програмуємо модель на ПК. Під програмуванням розуміємо виконання операцій, необхідних для трансляції всіх логічних побудов і математичних формулювань на мову ПК.

Програмування – одна із основних задач на етапі реалізації моделі, який передбачає:

- розподіл моделі на модулі;
- побудову блок-схеми програми;
- складання програми в кодах вибраної ПК або алгоритмічною мовою;
- налагодження програми транслятором, використанням тестових прикладів;
- уточнення і виправлення блок-схеми програми;
- визначення часу на реалізацію моделі;
- підготовку форми подання вхідних і вихідних даних.

Завершальною операцією другого етапу є перевірка достовірності реалізації моделі, яку виконують на трьох рівнях – контролюють окремі блоки програми розв'язанням на ПК різних задач-тестів з метою перевірки логічних і арифметичних операцій; всі частини програми об'єднуються в єдиний комплекс обчислення і перевіряється модель загалом.

**Результати моделювання.** На третьому етапі (рис. 13.1), який вимагає 30–40% всіх зусиль, ПК використовують для багаточисленних робочих розрахунків, аналізу результатів і прийняття пропозицій (рекомендацій). Заздалегідь потрібно скласти план, в якому вказують значення вхідних параметрів і результати моделювання. Під час розрахунків варто звернути увагу на правильність підготовки початкових даних, а також на повноту і правильність результатів обчислень на ПК. Для вивчення і аналізу даних необхідне їх наочне і компактне подання у вигляді таблиць, карт і діаграм. Використовуючи графіки, треба вибрати найприйнятніший масштаб, а подані в ньому параметри правильно позначити з урахуванням одиниць вимірювання.

Після аналізу результатів можна зробити висновок, наскільки вони допомагають вирішенню цієї проблеми. Цей процес полегшується, якщо оцінка вихідних даних попередньо добре спланована. Підсумовуючи, варто зазначити головні особливості одержання результатів і зробити деякі зауваження про величини початкових змінних і параметрів системи. Висновок повинен бути якісним і ґрунтуватись на одержаних в результаті моделювання даних. Наприкінці третього етапу складають докладну документацію поетапно і всієї моделі загалом. Звичайно її оформляють у вигляді звіту, який містить інструкції і програми на ПК і повинен зрозуміло і точно відтворювати весь процес моделювання.

### **13.5. Способи одержання на ПК псевдовипадкових чисел із заданим законом розподілу та рівномірно розподілених чисел**

**Одержання на ПК псевдовипадкових чисел за заданим законом розподілу.** Розглянемо методи визначення законів розподілу випадкових величин, які дозволяють описувати низку ймовірних явищ за допомогою найбільш загальних стохастичних моделей. Закони розподілу є вихідним матеріалом для моделювання за методом Монте-Карло, тобто, знаючи їх, можна отримати послідовності випадкових величин за будь-яким законом розподілу. Якщо однією із основних задач математичної статистики є одержання за статистичними даними закону розподілу випадкової величини, то розв'язання оберненої задачі відтворення будь-якої кількості випадкових величин на ПК, які відповідають заданому закону – основа методу Монте-Карло [124, 128, 212].

Отже, для практичного використання методу Монте-Карло необхідно отримати на ПК достатньо довгі послідовності випадкових чисел з заданим законом розподілу. Відомі три основні прин-



ципи одержання випадкових чисел: використання таблиць випадкових чисел; застосування спеціального методу Неймана; вживання аналітичних методів, які засновані на функціональних співвідношеннях. Для розуміння суті побудови таблиць випадкових чисел і їх використання виконаємо такий дослід. Напишемо на десяти однакових клаптиках паперу цифри 0, 1, 2, ... 9. Покладемо їх у шапку, перемішаємо і витягуватимемо по два клаптики, кожний раз повертаючи їх назад і знову перемішуючи. Отримані так двозначні цифри записуємо у вигляді таблиці (наприклад, 74, 45, ...), їх можна скласти на декілька сотень значень, ввівши в пам'ять ПК, і під час розрахунку брати чергову цифру.

Окрім того, можна скласти різні таблиці випадкових чисел, які сукупно підкоряються будь-якому закону розподілу, що задається, і застосовувати їх під час реалізації різних ідей з використанням методу Монте-Карло. Деякі з існуючих таблиць були отримані перестановкою багатозначних чисел з математичних таблиць, інші були складені розігруванням лотереї, перетасуванням колоди карт або за допомогою спеціально спроектованого приладу. Всі опубліковані таблиці було перевірено за допомогою стандартних статистичних тестів.

На практиці широко розповсюджені таблиці рівномірно розподілених чисел [128, 212]. Найбільша із надрукованих в літературі має 1000000 цифр; вона складена за допомогою спеціально сконструйованої рулетки з використанням електроніки. Інші принципи формування на ПК випадкових чисел (метод Неймана і методи функціональних співвідношень) побудовані на основі рівномірно розподілених в інтервалі (0,1) випадкових чисел, які обробляються на ПК за допомогою програмного способу,

**Одержання рівномірно розподілених чисел.** Відомо декілька методів, придатних для отримання випадкових чисел, але кожен з них повинен бути статистично надійним і ефективним в ПК. Під час використання стохастичних моделей доводиться багаторазово звертатись до випадкових чисел, рівномірно розподілених на інтервалі (0,1), оскільки більшість законів розподілу вживають їх. Тому високоефективні способи одержання випадкових чисел, які називаються псевдовипадковими, зменшують витрати часу порівняно з малоефективними. Отримати за допомогою ПК рівномірно розподілені числа можна декількома способами. Одним із них є введення таблиць рівномірно розподілених випадкових чисел у пам'ять ПК і зчитування їх з ходом рішення. Недолік цього способу полягає в тому, що необхідно використовувати оперативну пам'ять ПК для зберігання таких таблиць,

що не завжди раціонально, бо часто оперативну пам'ять треба завантажувати різною інформацією, яка належить безпосередньо до моделювання, а через обмежений обсяг таблиць точність розрахунку знизиться. На практиці доводиться приймати компромісне рішення з урахуванням швидкості розрахунку, точності і обсягу пам'яті [128].

Другий спосіб полягає у використанні додаткового обладнання на ПК – генератора випадкових чисел, який дозволяє на кожному такті роботи ПК у фіксованій стандартній комірці пам'яті одержувати нове випадкове число. Цей спосіб характеризується високим швидкодійним джерелом одержання випадкових величин, але вимагає деякого пристосування ПК для забезпечення зв'язку з генератором випадкових чисел.

Найбільш розповсюджений сьогодні є спосіб одержання рівномірно розподілених чисел на ПК на основі відповідної програми за допомогою деякого рекурентного співвідношення. Це значить, що кожне наступне число  $a_{i+1}$  утворюється із попереднього  $a_i$ , застосуванням деякого алгоритму, який складається із арифметичних і логічних операцій.

Обчислювальну схему генерації випадкових чисел із рівномірним розподілом в інтервалі (0,1) отримують за таким рекурентним правилом.

Нехай  $\xi_{n-1}$  є  $m$ -розрядне двійкове число вигляду

$$\xi_{n-1} = \varepsilon_1 \cdot 2^{-1} + \varepsilon_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \varepsilon_m \cdot 2^{-m}. \quad (13.1)$$

Тоді його квадрат

$$\xi_{n-1}^2 = \delta_1 \cdot 2^{-1} + \delta_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \delta_m \cdot 2^{-2m}. \quad (13.2)$$

За шукане вибираємо середину квадрата цього числа:

$$\xi_n = f(\xi_{n-1}) = \delta_{\frac{m}{2}+1} \cdot 2^{-1} + \delta_{\frac{m}{2}+2} \cdot 2^{-2} + \dots + \delta_{\frac{m}{2}+m} \cdot 2^{-m}. \quad (13.3)$$

Одержані так числа  $\xi_n$  будуть рівномірно розподілені на інтервалі (0,1). Для одержання рівномірно розподіленого числа  $\xi^*$  на інтервалі  $(a, b)$  справедливе співвідношення

$$\xi^* = a + \xi(b - a). \quad (13.4)$$

Розглянемо метод середини квадратів. Нехай задане чотиризначне число  $\xi_1 = 0,9876$ . Підносячи його до квадрата, одержимо восьмизначне  $\xi_1^2 = 0,97535376$ . Виберемо чотири середні цифри цього числа і приймемо  $\xi_2 = 0,5353$ . Потім піднесемо у квадрат, виберемо чотири середні цифри і т. д.

Метод одержання псевдовипадкових чисел має такі переваги:

- достатньо високу швидкість генерування випадкових чисел;
- простоту і невелику за обсягом програму на ПК;
- можливість відтворення будь-якого числа, що полегшує налагодження програми;
- якість послідовності перевіряється тільки один раз з наступним багатократним використанням під час розрахунку подібних задач.

Єдиний його недолік – обмеженість запису псевдовипадкових чисел. Однак існують способи, які дозволяють одержувати достатньо великі послідовності чисел, наприклад, змінюючи початкове значення.

Розглянемо тепер метод одержання рівномірно розподілених випадкових чисел на інтервалі  $(0,1)$ , який ґрунтується на операціях піднесення до степеня і взяття залишку (рис. 13.2). Обґрунтуванням математичних методів отримання псевдовипадкових чисел на ПК слугує передусім те, що результати перевірки за допомогою стандартних статистичних тестів не суперечить гіпотезі випадковості. У будь-якому разі прийнятність детермінується тільки статистичним випробуванням результатів.

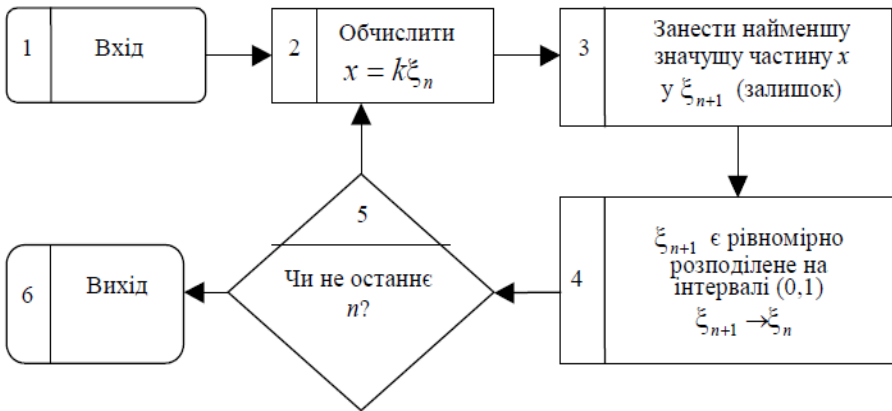


Рис. 13.2. Блок-схема формування на ПК псевдовипадкових чисел

Випадкові числа формуються у двійковій системі, тому під час обчислень розглянемо еквівалентні двійкові, вісімкові та десяткові величини (табл. 13.1).

**Крок 1.** Обчислити добуток  $k\xi_n$ .

**Крок 2.** Заповнити значиму частину  $k\xi_n$  (трирозрядне восьмиричне число), яке рівномірно розподілене і дорівнює

$\xi_{n+1} = 100100100$  у двійковій системі, 440 у вісімковій і 288 – у десятковій, так як  $440_8 = 288_{10}$ .

Таблиця 13.1

Подання випадкових чисел у різних системах

Числа	Двійкові	Вісімкові	Десяткові
$k$	001 011 001	131	89
$\xi_n$	000 100 000	40	32
$k\xi_n$	101 100 100 000	5440	2848
$\xi_{n+1}$	100 100 100	440	288

*Зауваження.* Наступне рівномірно розподілене число обчислюється як  $k\xi_{n+1}$ , тобто  $(131 \cdot 440)_8$ , або  $(89 \cdot 288)_{10}$ .

### 13.6. Одержання псевдовипадкових чисел методом Неймана та за дискретними законами

**Метод Неймана.** Одним із найуніверсальніших способів одержання псевдовипадкових чисел з будь-яким законом розподілу є метод Неймана [128, 212, 222]. Тут вимагається, щоб можливі значення випадкової величини не виходили за межі деякого обмеженого інтервалу  $(a, b)$ , що практично легко здійснити для будь-якого закону розподілу, обмеживши діапазон зміни випадкової величини в загальному випадку від  $-\infty$  до  $+\infty$  числовими значеннями  $a$  і  $b$  з міркувань точності.

Нехай маємо область, обмежену віссю абсцис і графіком  $f(t)$  щільності розподілу випадкової величини в інтервалі  $(a, b)$ , а  $f_m$  – максимальна ордината. Вибираємо значення  $k$  таке, щоб виконувалась нерівність  $kf_m < 1$ .

Нехай  $\xi_1, \xi_2$  – рівномірно розподілені випадкові величини, причому  $\xi_1$ , розподілено в інтервалі  $(a, b)$ , а  $\xi_2$  – в інтервалі  $(0, 1)$ . Якщо  $kf_m(\xi_1) \geq \xi_2$ , то число  $\xi_1$  буде шуканою випадковою величиною, розподіленою зі щільністю  $f(t)$ . Якщо ж  $kf_m(\xi_1) < \xi_2$ , то пара  $(\xi_1, \xi_2)$  відкидається і беремо наступну нову пару чисел, одне з яких  $\xi_3$  із  $(a, b)$ , інше  $\xi_4$  з інтервалу  $(0, 1)$ , а перевірку продовжуємо доти, поки не буде знайдено число  $\xi_3$ , яке вимагається, і т.д.

Легко впевнитись у справедливості такого методу. Насправді кожну пару випадкових чисел  $\xi_1, \xi_2$  можна розглядати як координати випадкових точок площини, рівномірно розподілених вздовж

осей  $t$  і  $f(t)$  всередині прямокутника  $aa'bb'$  (рис. 13.3). Пари  $\xi_1$  і  $\xi_2$ , які задовольняють умову  $kf_m(\xi_1) \geq \xi_2$ , – це координати випадкових точок площини, рівномірно розподілених вздовж осей  $t$  і  $f(t)$  всередині тієї частини прямокутника, яка розміщена під кривою  $f(t)$ . Ймовірність того, що випадкова точка площини, яка розташована під кривою  $f(t)$ , виявиться в елементарній смугі з основою  $(t, t + \Delta t)$ , очевидно, пропорційна  $f(t)$ , а ймовірність точки, яка падає під криву  $f(t)$ , за умовою дорівнює оцінці, що вимагається.

Розглянемо метод Неймана на прикладі. Нехай щільність розподілу повздовжніх нахилів дороги, яка виражається в стотисячних на інтервалі  $(-6, 6)$ , описується законом Коші:

$$f(t) = \frac{0,1}{1 + 0,1t^2}. \quad (13.5)$$

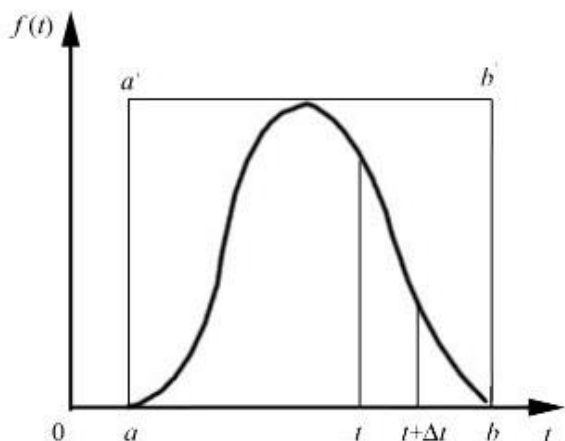


Рис. 13.3. Щільність розподілу  $f(t)$  і прямокутник  $aa'bb'$ , що її обмежує

Виберемо  $k$  так, щоб  $kf_m < 1$ . Із рівняння (13.5)  $f_m = 0,1$ , тоді можна прийняти  $k = 10$ .

Змоделюємо на ПК або виберемо із таблиці випадкових чисел два рівномірно розподілених на інтервалі  $(0, 1)$  випадкові числа.

Нехай  $\xi_1 = 0,2$ ;  $\xi_2 = 0,9$ . Тоді, використовуючи рівняння (13.4) і враховуючи, що  $a = -6$ ,  $b = 6$ , маємо

$$\xi^* = -6 + 0,2[6 - (-6)] = -3,6.$$

Перевіримо умову  $kf_m(\xi_1^*) \geq 0,9$ , тобто

$$10 \cdot \frac{0,1}{1 + 0,1 \cdot (-3,6)^2} = 0,4 < 0,9;$$

Отже, пара чисел  $\xi_1 = 0,2$  і  $\xi_2 = 0,9$  відкидається.

Виберемо нову пару  $\xi_3 = 0,5$  і  $\xi_4 = 0,3$ ; тоді  $\xi_3^* = -6 + 12 \cdot 0,5 = 0$ .

Перевіривши умову

$$10 \cdot \frac{0,1}{1 + 0,1 \cdot 0^2} = 1 > 0,3,$$

стверджуємо, що пару  $\xi_3 = 0,5$  і  $\xi_4 = 0,3$  приймаємо як псевдовипадкові числа, одержані за законом Коші (13.5).

**Отримання псевдовипадкових чисел за дискретними законами.** Розглянемо одержання таких чисел для найбільш розповсюджених *біноміального* і *Пуассонового* дискретних законів розподілу. Для біноміального табличний метод малоприматний, оскільки таке розподілення характеризується двома параметрами  $n$  і  $p$  [128]. Щоб отримати одне значення випадкової величини, розподіленої за біноміальним законом з параметрами  $n$  і  $p$  необхідно вибрати  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) рівномірно розподілених величин в інтервалі  $(0, 1)$  і для кожного із них перевірити виконання умови

$$\xi_i \leq p \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (13.6)$$

Загальна кількість значень чисел  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), менших або таких, що дорівнюють  $p$ , представляють одне псевдовипадкове число, розподілене за біноміальним законом.

Для утворення послідовності  $N$  чисел потрібно взяти  $N$  груп по  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) чисел і перевірити виконання умови (13.6).

Проілюструємо обчислювальну схему на прикладі [35]. Нехай  $n = 5$ , а  $p = 0,4$ ;  $\xi_1 = 0,34$ ;  $\xi_2 = 0,76$ ;  $\xi_3 = 0,02$  і  $\xi_4 = 0,42$ ; тоді умові (13.6) відповідає  $\xi_1 < 0,4$  і  $\xi_3 < 0,4$ , тобто кількість таких чисел дорівнює 2. Отже, одержано одне число  $\xi = 2$  розподілене за біноміальним законом.

Розглянемо спосіб отримання псевдовипадкових чисел, які підкоряються закону *розподілу Пуассона*

$$P(m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a} \quad (m = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (13.7)$$

з математичним очікуванням  $a$ .

Виберемо таке достатньо велике  $m$ , щоб

$$P(m) = \frac{a}{m} \leq 0,1 \quad (13.8)$$

було достатньо малим (практично можна брати  $P(m) \leq 0,1$ ).

Щоб одержати одне псевдовипадкове число  $m$  рівномірно розподілених чисел  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в інтервалі  $(0, 1)$  і для кожного з них перевірити виконання умови

$$\xi_i \leq 0,1, \quad (13.9)$$

то кількість випадків виконання цієї умови буде реалізацією закону Пуассона із середнім значенням  $a$ , тобто шуканим псевдовипадковим числом. Для одержання  $N$  таких чисел необхідно моделювати  $N$  серій по  $m$  чисел  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

Нехай для  $a = 4$  необхідно одержати одне псевдовипадкове число, розподілене за законом розподілу Пуассона. Тоді із (13.8)

$$\frac{1}{m} \leq 0,1, \text{ тобто } m = 11.$$

Виберемо із таблиці випадкових чисел [35] або, наприклад, одержимо на ПК:

$$\begin{aligned} \xi_1 = 0,11; \xi_2 = 0,15; \xi_3 = 0,02; \xi_4 = 0,02; \xi_5 = 0,82; \xi_6 = 0,92; \\ \xi_7 = 0,69; \xi_8 = 0,14; \xi_9 = 0,61; \xi_{10} = 0,36; \xi_{11} = 0,21. \end{aligned}$$

Із 11 значень  $\xi_i$  тільки два менші за  $0,1$ :  $\xi_3 = 0,02 < 0,1$  і  $\xi_4 = 0,02 < 0,1$ ; отже, одержане одне псевдовипадкове число  $m = 2$ , розподілене за законом Пуассона. Описаний спосіб використаний для отримання радіусів горизонтальних кривих плану під час моделювання експлуатації прогонових споруд або руху автомобіля [36, 128] в різних дорожніх умовах.

### 13.7. Висновки до розділу 13

У деяких випадках є неможливо виконати обстеження та випробування до руйнування для встановлення необхідних показників надійності та довговічності конструкцій. У цьому випадку необхідно застосовувати методи моделювання та аналізу систем. Зокрема в цьому розділі сформульовано суть методів моделювання і галузь їх використання, описано основні моделі, технічне моделювання та математичне моделювання та їх недоліки і переваги. Зокрема, описано метод статистичних випробувань Монте-Карло, основні етапи побудови моделі та формування її задуму, реалізація моделі та аналіз результатів моделювання і способи одержання на ПК псевдови-

падкових чисел із заданим законом розподілу, одержання таких чисел методом Неймана та за дискретними законами. Результати цих досліджень склали основні висновки:

1. У цьому розділі сформульовано основні методи моделювання та аналіз систем. Зокрема, розглянуто суть методів моделювання й галузь їх використання. Наведено найбільш, економічні інформаційні процедури і що вони описують та або визначають певні показники чи зміст формат і швидкість потоку інформації, та розрізняють два види моделей, детерміновані і недетерміновані. Технічне моделювання використовують під час вибору конструкцій споруди.

2. Описано суть математичних моделей в основі яких покладено формально-логічний апарат математики і показано їх універсальність які описують явище або систему утворюють імітаційну моделюючу систему. Для аналізу таких систем, можна використовувати моделювання на ПК яке має значні переваги, які описано в цьому розділі. Розроблені також основні критерії і здійснюють моделювання в три етапи, на першому вивчають проблему, на другому формалізуються у вигляді математичних співвідношень, на третьому апробують модель і аналізують результати.

3. Сформульовано суть методу статистичних випробувань, де класичні методи математики не завжди придатні, застосовують метод статистичного моделювання на ПК, який отримав назву методу Монте-Карло. Суть цього методу проілюстровано на прикладі. Перевага цього методу полягає в тому, що не завжди вдається використати апарат теорії масового обслуговування і дорогий експеримент складних моделей.

4. Детально розглянуто і описано основні етапи побудови моделі та формування її задуму. Приведено блок-схему основних етапів моделювання. Представлено процес реалізації моделі та результати моделювання. Описано одержання на ПК псевдовипадкових чисел за заданим законом розподілу та способи одержання їх. Розроблено блок-схему формування на ПК псевдовипадкових чисел та подання випадкових чисел у різних системах. Наведено також одержання псевдовипадкових чисел методом Неймана та за дискретними законами.



## 14. МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 14.1. Загальні положення і класифікація методів моделювання будівельних конструкцій

Моделюванням називають дослідження, які виконують на моделях або реальних установках з використанням теорії подібності під час постановки й оброблення результатів експерименту [124, 125, 193, 217]. Подібними вважають явища, в яких всі параметри (повна подібність) або найістотніші (неповна) відрізняються під відповідних параметрів іншого явища у певну визначену кількість разів, що називається масштабом. Визнаними подібними явищами є числово однакові критерії. Подібність явищ може бути фізичною і математичною. У фізично подібних явищах всі процеси мають однакову фізичну природу. У математично подібних вони мають різну фізичну природу, але описуються однаковими рівняннями чи їх системами. Явище або механічну систему, які моделюють, називають оригіналом або натурою. Змодельоване явище чи систему називають моделлю. Під моделями розуміють установки, комбінації окремих елементів або суму логічних уявлень, які сприймають явище або групу явищ, подібних до явища, яке вивчається. Моделі поділяють на математичні (які дають змогу реалізувати математичну подібність), геометричні (які дають тільки геометричну подібність без відображення природи явищ), фізичні (які зберігають подібність основних фізичних процесів явища).

Метод моделювання – один з найбільш раціональних, зручний і доступний для дослідів і спостережень, дає можливість економити засоби і матеріали та скорочувати час досліджень, а також виконувати глибші і обширніші експериментальні дослідження. Він дозволяє також узагальнювати дослідження, розповсюджувати отримані результати не тільки на один модельований зразок, а й на цілу групу явищ, пристроїв, подібних до зразка, що моделюється, і виготовляти та повторювати їх у різних масштабах. Під моделюванням будівельних конструкцій розуміють експериментальне дослідження напружено-деформованого стану споруди, виконаної у вигляді моделі певного масштабу. Залежно від мети під час моделювання виявляють загальну картину роботи споруди і її несучу здатність та одержують повні і детальні відомості про напружено-деформований стан. Розробляють методики досліджень, які дуже подібні до методик дослідження натурних конструкцій.

Модель будівельної конструкції – це копія споруди, виконана у певному масштабі так, щоб процеси, які вивчаються в натурному об'єкті і його моделі, були подібними. За допомогою моделювання будівельних конструкцій виконують передусім такі завдання:

- вивчають напружено-деформований стан конструкцій на різних етапах навантаження під дією силових та інших факторів;
- досліджують роботу конструкцій, схем і механізмів руйнування;
- перевіряють і уточнюють закладені в теорію розрахунку вихідні умови, гіпотези та припущення;
- визначають достовірність теоретичних розрахунків загалом;
- встановлюють зусилля в складних спорудах, коли методи теоретичних дисциплін важко застосувати, або вони вимагають значної витрати засобів і часу;
- вивчають нові конструкції та матеріали.

Метод моделювання можна застосувати до вивчення споруд, які проектується, з подальшим вибором оптимального рішення. Це дає можливість своєчасно зробити в проєкт відповідні корективи, що скоротить обсяг натурних випробувань. Моделювання може бути фізичним і математичним.

Особливо велике значення модельних випробувань складних споруд просторових конструкцій, тонкостінних оболонок і пластин. Методи їх розрахунку ґрунтуються на низці гіпотез, які вводять без достатньо повного їх обґрунтування. Тому необхідно детально вивчити роботу таких споруд експериментально. При тому спочатку досліджують моделі малого масштабу, уточнюють і виправляють проєкт конструкції, а потім випробовують великомасштабні моделі із матеріалів, тотожних натурним і геометрично подібних до них. На цих моделях вивчають несучу здатність споруд, їх напружено-деформований стан, жорсткість системи загалом. Залежно від мети та методики, можна моделювати:

- умови дії різних видів навантаження на будівлі, споруди (побудова макета споруди, на якому моделюються тільки контури і характер її стики зовнішніх поверхонь);
- розрахункові схеми будівель і споруд для експериментально-механічних розрахунків, щоб замінити теоретичні; при тому моделлю є механічний прилад, який автоматично розв'язує для цієї схеми рівняння будівельної механіки;
- елементи споруд з метою виявлення напружено-деформованого стану на поверхні і їх основних перерізах;

- будівлі, споруди для уточнення розрахункових схем, особливості тріщиноутворення і схеми руйнування;
- будівлі і споруди для виявлення їх функціонування в реальних умовах.

## **14.2. Основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій**

Завданням фізичного моделювання є визначення характеристик основної споруди за параметрами моделі, одержаними під час її випробування. Особливістю фізичного моделювання є те, що для обчислення характеристик основної споруди не вимагається математичного опису процесів, достатньо тільки мати уявлення про механізм (фізичну природу) явища, щоб правильно розрахувати параметри основної споруди за даними випробування моделі. Оскільки під час фізичного моделювання фізична природа явищ, які відбуваються у натурному виробі і моделі, однакова, за результатами дослідів на моделях можна оцінювати характер ефектів і кількісні взаємозв'язки між величинами для наступних умов. Основою фізичного моделювання є теорія подібності. Окремими видами фізичної подібності є: геометрична (подібність відповідних геометричних елементів або тіл); кінематична (подібність полів швидкості для двох рухів, які розглядаються); динамічна (подібність систем діючих сил або силових полів різної фізичної природи – сили тяжіння, тиску тощо); механічна (передбачає наявність геометричної, кінематичної та динамічної подібності); подібність теплових процесів, електродинамічна [128, 193, 217, 222].

Під час механічного моделювання розрізняють просту і розширену подібності, які можуть бути і наближеними. Загальними умовами цих подібностей є таке: модель і натура повинні бути геометрично подібними; навантаження, що діють на модель, мають бути подібними до тих, що діють на натуру; безрозмірні величини (коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт тертя, відносна деформація тощо) повинні бути однаковими для моделі та природи; матеріал моделі і природи може бути різним, але в досліджуваній галузі зв'язки напружень і деформацій мають відповідати закону Гука. Різниця між простими та розширеними подібностями полягає в тому, що за першої коефіцієнти подібності для напружень, модулі пружності однакові, а за другої – різні, причому в останньому випадку можуть бути різними і пружні постійні матеріалів моделі, і природи. До того ж бажано, щоб коефіцієнти Пуассона були однаковими.

Фізичне моделювання складається із двох етапів:

- теоретичне відтворення на моделі фізичного явища, яке вивчається, або технічного пристрою (а також конструкції і споруди), подібного до натурального зразка;
- виготовлення моделей і виконання на них спостережень та вимірювань, які вимагаються у постановці задачі.

Теорія моделювання ґрунтується на теорії подібності. Перерахунок даних стосовно основної споруди або будівлі, одержаних на основі модельного зразка, виконують на базі теорії подібності.

### 14.3. Відомості про теорію подібності та розмірності фізичного моделювання будівельних конструкцій

Основою фізичного моделювання є теорія подібності, яка ґрунтується на аналізі розмірностей. Моделі конструкцій або споруд є подібними до натурних, якщо у схожі моменти часу у відповідних точках значення змінних величин, які характеризують стан моделі, пропорційні відповідним значенням величин натурних конструкцій або споруд [124, 128, 217]. Із цього зрозуміло, що характеристики натурних об'єктів можна одержати простим перерахунком характеристик модельних об'єктів, встановлених експериментально. Для всіх величин цієї розмірності таким множником є коефіцієнт подібності (множник масштабного перетворення). Так, матеріали конструкції  $M$  і моделі  $M'$  називаються механічно подібними, якщо  $\sigma' = \delta\sigma$ ;  $\varepsilon' = \gamma\varepsilon$ ;  $t' = \delta t$ ;  $\rho' = \delta\rho$ , де  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\delta$  – множники подібності відповідно для напружень, деформацій, часу і густини (щільності).

Для матеріалів з лінійною пружністю

$$\varepsilon' = \frac{\beta}{\gamma} \varepsilon; G' = \frac{\beta}{\gamma} G; M' = M. \quad (14.1)$$

У межах текучості  $\sigma'_s = \beta\sigma_s$ , у межах руйнування –  $R' = \beta R$ .

Всі множники подібності  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\delta$  повинні бути постійними для порівнюваних матеріалів, з яких виготовлено конструкцію  $M$  і модель  $M'$ .

Для подібності стану двох тіл  $A$  і  $A'$  повинні виконуватись умови

$$\sigma'_0 = \beta\sigma_0, \varepsilon'_0 = \gamma\varepsilon_0, \quad (14.2)$$

де:  $\sigma_0$ ,  $\sigma'_0$  і  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon'_0$  – відповідно початкові напруження і деформації у моменти часу  $t_0$  і  $t'_0 = \eta t_0$ ;

$$\bar{q}' = \alpha\beta\bar{q}, \quad (14.3)$$

тут  $\bar{q}$  і  $\bar{q}'$  погонні навантаження, розподілені вздовж подібних кривих  $C$  і  $C'$  на поверхнях  $\Sigma$  і  $\Sigma'$  конструкції  $A$  і  $A'$ ;

$$P' = \alpha^2\beta P, \quad M' = \alpha^3\beta M, \quad (14.4)$$

де:  $P$ ,  $P'$  і  $M$ ,  $M'$  – відповідно зосереджені сили і моменти, прикладені до певних точок тіл  $A$  і  $A'$ .

Якщо граничні умови для конструкції  $A$  задані у зміщеннях точок поверхні, то для забезпечення подібного стану необхідно надати подібним відповідним точкам моделі  $A'$  зміщення

$$U' = \alpha\gamma U. \quad (14.5)$$

Якщо граничні умови для тіла  $A$  задані частково у напруженнях  $\sigma$  і частково у зміщеннях  $U$ , то у відповідних схожих точках моделі  $A'$  повинні бути визначені:

$$\sigma' = \beta\sigma \text{ і } U' = \alpha\gamma U. \quad (14.6)$$

Для деформування тіл  $A$  і  $A'$  геометричну подібність у точності зберігають тільки за умови  $\gamma = 1$ . Тому умова подібності при  $\gamma \neq 1$  справедлива тільки у разі малих переміщень, коли можна вважати, що геометрична подібність тіл не порушується.

Якщо граничний стан тіла  $A$  досягається під навантаженнями, розподіленими по поверхні (напруження  $\sigma_{zp}$ ) або вздовж ліній (зусилля  $q_{zp}$ ), а також при зосереджених силах  $P_{zp}$  і моментах  $M_{zp}$ , то граничний стан тіло  $A'$  досягне за умов:

$$\sigma'_{zp} = \beta\sigma_{zp}; \quad q'_{zp} = \alpha\beta q_{zp}; \quad P'_{zp} = \alpha^2\beta P_{zp}; \quad M'_{zp} = \alpha^3\beta M_{zp}. \quad (14.7)$$

Якщо температура  $\Delta T$  змінюється в оригіналі, то в моделі треба забезпечити розподіл

$$\Delta T' = \gamma \frac{\alpha_T^*}{\alpha_T} \Delta T, \quad (14.8)$$

де:  $\alpha_T$  і  $\alpha_T^*$  – коефіцієнти лінійних температурних видовжень тіл  $A$  і  $A'$ , що підпорядковуються умові  $\varepsilon' = \gamma\varepsilon$ .

Доведено, що якщо причина розвитку тріщин – досягнення в крихкому тілі границі міцності, то за виконання вказаних умов подібності, тріщини у схожих тілах розташовані подібно, причому ширина тріщини в тілі  $A$  відрізняється від ширини тріщини в тілі  $A'$  в  $\alpha\gamma$  раз, тобто  $a' = \alpha\gamma a$ .

Отже, для подібних тіл під статичним навантаженням можна забезпечити подібність граничних станів за несучою здатністю, де-

формаціями і тріщиноутворенням. Теорії подібності та розмірностей використовують одночасно внаслідок спільності методів і задач. Причому, якщо теорія подібності досліджує різні явища, які описуються математично достовірними рівняннями, то теорія розмірності вивчає одне явище і встановлює вид рівняння, яке його описує. Метод аналізу розмірності є основою теорії подібності; він поєднує теоретичні дослідження поведінки будівельних конструкцій з відповідними експериментальними даними. В основі теорії розмірності лежить відоме положення, що всі члени рівнянь, які описують фізичне явище, повинні мати однакову розмірність. Величина, значення якої залежить від прийнятої системи одиниць, називається розмірною, якщо не залежить, – безрозмірною. Розмірність величини визначається добутком показників множників, які символізують основні величини:

$$[a] = A_1^\alpha \cdot A_2^\beta \cdot A_3^\gamma \dots, \quad (14.9)$$

де:  $[a]$  – похідна одиниця;  $A_1, A_2, A_3$  – основні одиниці;  $\alpha, \beta, \gamma$  – будь-які дійсні числа. На протигагу від похідних розмірних одиниць, безрозмірні не міняють свого числового значення з переходом від однієї системи в іншу.

Аналіз різних перетворень розмірностей дозволяє зробити висновки, що будь-яке фізичне співвідношення між розмірними величинами можна сформулювати як співвідношення між безрозмірними. До того ж метод аналізу розмірностей у кожному конкретному прикладі дозволяє простежити вплив кожного із аргументів і всіх разом на остаточний результат. Природно, що для одержання конкретного виду функції аналіз необхідно доповнити експериментальними дослідженнями.

Розглянемо моделювання просторових і плоских стержневих систем. Для них зберігання геометричної подібності моделі та натури в осях є необхідною умовою, інакше досліджуватиметься споруда з іншою розрахунковою схемою. Тому лінійний масштаб повинен бути однаковим у всіх напрямках і за всіма елементами модельної споруди. До того ж бажано зберігати геометричну подібність поперечних перерізів елементів. Оскільки в стержневих системах значний вплив нормальних сил, то повинно виступити співвідношення

$$m_{EF}^i = \frac{m_{EI}^i}{m_i^2}, \quad (14.10)$$

де:  $m_{EF}, m_{EI}, m_i$  – масштабні множники для  $i$ -х елементів відповідно при жорсткості  $EF, EI$  і довжині елемента  $l$ .

До того ж, якщо вплив згинальних і крутних моментів незначний і переважають деформації від нормальних сил (що звичайно спостерігається при шарнірному спряженні елементів), подібність можна зберегти тільки за жорсткістю на стиск-розтяг і масштаб вибрати довільним.

Вид спряжень елементів стержневої системи у моделі повинен відповідати виду спряжень у натурній споруді (жорстке, шарнірне тощо). Під час моделювання зосередженого навантаження у довільному масштабі (це саме стосується і призначення поперечних перерізів елементів) необхідно враховувати вимоги стійкості елементів моделі, інакше спотворюватиметься картина напружено-деформованого стану натурної споруди. Так, під час втрати стійкості повинні виконуватись такі масштабні співвідношення:

$$m_{\sigma} = \frac{m_p}{m_i^2}; m_q = m_i m_{\sigma} = \frac{m_p}{m_i}; m_u = \frac{m_p m_i^3}{m_{EI}} = \frac{m_{\sigma} m_i^5}{m_{EI}}. \quad (14.11)$$

Для забезпечення геометричної подібності моделі та натурної споруди після втрати стійкості необхідно, щоб  $m_u = 1$ , тобто зберігалось співвідношення

$$m_p m_i^3 = m_{\sigma} m_i^5. \quad (14.12)$$

Під час моделювання пластин треба дотримуватись таких правил. Модель і споруда повинні бути геометрично подібні, причому масштаб навантажень  $m_p$  може бути довільним, але має забезпечити пружну роботу матеріалу моделі. Далі необхідно зберегти рівність масштабів моделювання деформацій для плоского напруженого стану і плоскої деформації:

$$m_{\gamma_{xy}} = m_{\varepsilon_x} = m_{\varepsilon_y} = \frac{m_p}{m_E m_i^2}. \quad (14.13)$$

Окрім цього, навантаження в моделі повинні прикладатись у відповідних точках і мати подібний розподіл, а умови закріплення бути однаковими з натурою. Масштабний множник для товщини пластинки може бути довільним, однак, таким, щоб модель і натура, наприклад, належали до одного і того самого класу тонких пластин. За однакових коефіцієнтів Пуассона матеріалів моделі і споруди можна користуватись такими масштабними множниками:

$$m_w = \frac{m_p m_e^2}{m_E m_h^3}; m_{\varepsilon_x} = m_{\varepsilon_y} = m_{\gamma_{xy}} = \frac{m_p}{m_E m_h^2} \quad (14.14)$$

Перехід від моделі до природи здійснюється простим множенням результатів експерименту на відповідні масштаби. Умови подібності дозволяють не тільки перейти від моделі до природи, але й узагальнити результати одного експерименту на всю групу подібних явищ. Якщо складені вирази, які зв'язують масштаби (індикатори подібності), то узагальнення можна використовувати до результатів будь-якого розрахунку або натурних випробувань.

Викладені основні засади теорії подібності та розмірності на доповнення до експериментальних досліджень є базою для вибору масштабу і матеріалу моделі, їхнього проектування і подальшого переведення даних експериментів на реальну конструкцію.

#### **14.4. Специфіка виготовлення фізичних моделей будівельних конструкцій**

Техніка виготовлення моделі, особливо за малих масштабів, пристроїв для її навантаження і робота з вимірювальною апаратурою вимагають спеціальних і оригінальних прийомів. Природне бажання до зменшення масштабу моделі для полегшення експериментів обмежується технологічними труднощами виготовлення малих деталей. Можна зауважити ще одну особливість моделювання – застосування достатньо складних систем навантаження, що імітують різновидність силових впливів, і більшу кількість вимірювальних приладів. Тому необхідно врахувати можливість розташування на моделі потрібної кількості приладів, можливість реалізації необхідних навантажень і економію матеріалів та часу.

До проектування моделі аналізується її розрахункова схема, напружений стан, наявність деформацій і напружень, характер попереднього напруження, граничні умови. Після того визначаються критерії й індикатори подібності. Коли для природи та моделі не вдається забезпечити рівність всіх критеріїв подібності, звертаються до наближеного моделювання. Тоді моделюють основні процеси явища, обходячи другорядні, або моделюють їх наближено. Найпростішою є геометрична подібність моделі та природи, виконаних із тотожних матеріалів, що мають однакові модулі пружності і коефіцієнти Пуассона. За наближеного моделювання розрахункові схеми натурної споруди можна скористатись будь-яким матеріалом, який має на діаграмі залежності між напруженнями і деформаціями ділянку пропорційності. Інколи можна застосувати матеріали моделі і природи з різними коефіцієнтами Пуассона, наприклад, під час моделювання плоских стержневих систем, плоскої задачі теорії пружно-



сті, чистого кручення тощо.

Для тонкостінних конструкцій типу пластин і оболонок (коли один із розмірів значно менший за два інші) строго виконати умови подібності практично неможливо і для них доцільніше використати розширену й афінну подібності. Для розширеної подібності у разі зберігання повної геометричної подібності можна застосувати нетотожні матеріали, подібні у механічному сенсі. До того ж модель виконують з іншого матеріалу, або із того самого, але випробовують за іншого рівня напружень. Як напруження, так і деформації у подібних (ідентичних) точках напруги і моделі відрізняються деякими множниками, які постійні для всього тіла. Під час використання лінійно-пружного ізотропного матеріалу критерієм подібності є рівність коефіцієнтів Пуассона і рівність одиниці множника подібності для деформацій. Для пружно-крихких матеріалів, поряд із вимогами подібності між напруженнями у моделі та натурі накладаються ще вимоги про подібність між напруженнями, які відповідають моменту руйнування.

Для пружно-пластичних матеріалів типу бетону, кам'яної кладки й інших аналогічних матеріалів повинні зберігатись такі умови подібності:

$$\varepsilon' = \gamma \varepsilon, E'_e = \frac{\beta}{\gamma} E, \lambda'_p = \lambda_p, C'_{zp} = \frac{1}{\gamma} C_{zp}, R'_{e,ser} = \beta R_{e,ser}, \quad (14.15)$$

де:  $\varepsilon'$ ,  $E'_e$ ,  $\lambda'_p$ ,  $C'_{zp}$ ,  $R'_{e,ser}$  – відповідно деформація, початковий модуль пружності, коефіцієнт пластичності, відносний модуль пластичності в момент руйнування, руйнівне напруження (нормативна призмova міцність) для моделі;  $\varepsilon$ ,  $E_e$ ,  $\lambda_p$ ,  $C_{zp}$ ,  $R_{e,ser}$  – ті самі величини для натурі (споруди);  $\beta$ ,  $\gamma$  – постійні множники подібності для напружень і деформацій ( $\beta = \sigma' / \sigma$ ;  $\gamma = \varepsilon' / \varepsilon$ ).

Бетон є неоднорідною системою і під час виготовлення із нього масштабних моделей повинен змінюватися, підкоряючись законам подібності. Виконані у НДІБК Національного університету «Львівська політехніка», Фізико-механічному інституті НАН України дослідження засвідчили, що для одержання найбільш вдалого складу бетону моделі, який забезпечує структурну подібність, потрібно у масштабі моделі змінити розмір фракції крупного заповнювача, не міняючи при цьому компоненти бетону і їх співвідношення. Для цього експериментально вивчали технологічні характеристики бетону зі зменшенням розмірів зразків і масштабним зменшенням гранул крупного заповнювача. Випробовували бетонні балки і куби розмірами: 10×10, 15×15, 20×20, 25×25, 30×30, 50×50,

70×70, 100×100 мм. На основі оброблення та узагальнення даних отримані емпіричні формули, які зв'язують масштаб і механічні характеристики бетону під час моделювання його структури. Одержані залежності дали змогу передбачити за руйнівним зусиллям моделі руйнівне зусилля натури (оригіналу).

Інколи у пружній стадії за необхідності моделювати роботу бетону можна скористатись пластмасами з коефіцієнтом Пуассона 0,33..0,38. Під час застосування прозорих пластмас з'являється можливість досліджувати поляризаційно-оптичним методом сіток. Однак у таких матеріалах до появи напружень текучості можуть виникнути значні деформації повзучості. Наприклад, під час роботи з органічним склом напруження не повинні перевищувати 4..6 МПа. Це накладає певні обмеження на конструкцію моделі. За можливості застосування пластмаси модель можна виконати у масштабі 1/50-1/20.

Треба відзначити, що питання вибору матеріалу для виготовлення моделі є одним із найважливіших у техніці моделювання і визначається матеріалом натурної споруди, його типом, суттю задачі моделювання, методикою і точністю моделювання, а також масштабом моделі.

#### **14.5. Модельні фізичні дослідження будівельних конструкцій та споруд**

Модельні дослідження складаються із таких етапів: підготовчого, постановки задачі дослідження, встановлення умов подібності моделі та натури, проектування експерименту на моделі, виготовлення моделі, пристроїв, монтажу вимірювальної апаратури, виконання експерименту на моделі, оброблення експериментальних даних, переходу від моделі до натури, аналізу результатів досліджень і складання рекомендацій [128]. Початковим етапом у розробці будь-якого проекту споруди створення основної конструктивної схеми і принципове вирішення вузлів, які визначають характер її роботи. Варіюванням різними конструктивними схемами і відповідною перевіркою їх на простіших моделях можна знайти оптимальний варіант.

Для постановки задачі дослідження насамперед необхідно встановити його мету. Насамперед виявляємо, чи маємо достатньо надійний спосіб теоретичного розрахунку цієї системи, чи цей спосіб потребує експериментальної перевірки повністю або тільки частково окремих припускень.

Отже, метою моделювання можуть бути такі задачі: виявлення загального характеру роботи системи під навантаженням; пере-

вірка правильності прийнятого методу розрахунку і окремих припущень або вихідних гіпотез; експериментальний розрахунок.

Загальний характер стану системи під навантаженням у пружній стадії визначають на моделях, виготовлених у малих масштабах із довільного матеріалу. Якщо потрібно перевірити метод розрахунку, то задача дослідження значно спрощується, оскільки вже не треба встановлювати умови переходу від моделі до природи. У таких випадках можна пропонувати розрахувати власну модель, а потім порівняти теоретичні результати з відповідними даними експериментальних досліджень. При тому можливе вивчення роботи конструкції як у пружній стадії, так і в гранично-рівноважному стані.

Для низки конструкцій і споруд немає необхідності повністю перевіряти у моделі конструкцію натурної споруди. Замість цього моделюють основні фізичні властивості, характерні для роботи конкретного конструктивного елемента у системі споруди. Так, наприклад, для панелі перекриття – це згинальна жорсткість, для вузлових спряжень і стикових з'єднань – податливість під час зсуву, розтягу і стиску. Це спрощує створення необхідних моделей і пришвидшує дослідження. Після вибору масштабів, характеристик матеріалів, геометричних розмірів моделі і навантажень для встановлення подібності моделі та природи у виписані математичні вирази вводимо масштабні перетворення. Одночасно вибираємо метод вимірювання деформацій, напружень або переміщень. Після виготовлення моделі, пристроїв для завантаження, випробування та монтажу вимірювальної апаратури виконують експеримент. Він зводиться до різних завантажень і зняття відліків. Прилади і пристрої попередньо тарують, а матеріали, із яких виготовлена модель, випробовують на зразках. Послідовність моделювання показана на схемі (рис. 14.1).

Методи оброблення експериментальних даних наведено у працях [38, 70, 87, 124, 127, 128]. Перехід від моделі до природи здійснюється перемноженням результатів експерименту на відповідні масштаби. Аналіз результатів дає уявлення про напружено-деформований стан системи. Під час докладного аналізу можна теоретично узагальнити і створити аналітичний метод розрахунку, що дозволить надалі не виконувати аналогічні експерименти.

Оптичний метод дослідження напружень [124, 128] полягає в тому, що прозора модель з оптично активного матеріалу (переважно з спеціального органічного скла) в навантаженому стані просвічується у поляризованому світлі. Зображення на екрані виявляється при тому покритим системою смуг, форма і розміщення яких ви-

значаються напруженим станом моделі. За допомогою аналізу отриманої картини є можливість знайти величину виникаючих напружень. За допомогою поляризаційно-оптичного методу можна розв'язати практично будь-які задачі (як для плоскої, так і для просторової моделей) і одержати напруження як по контуру моделей, так і всередині їх об'єму. Однак задача аналізу об'ємного напруженого стану значно складніша як за технікою експерименту, так і за обробленням отриманих результатів.

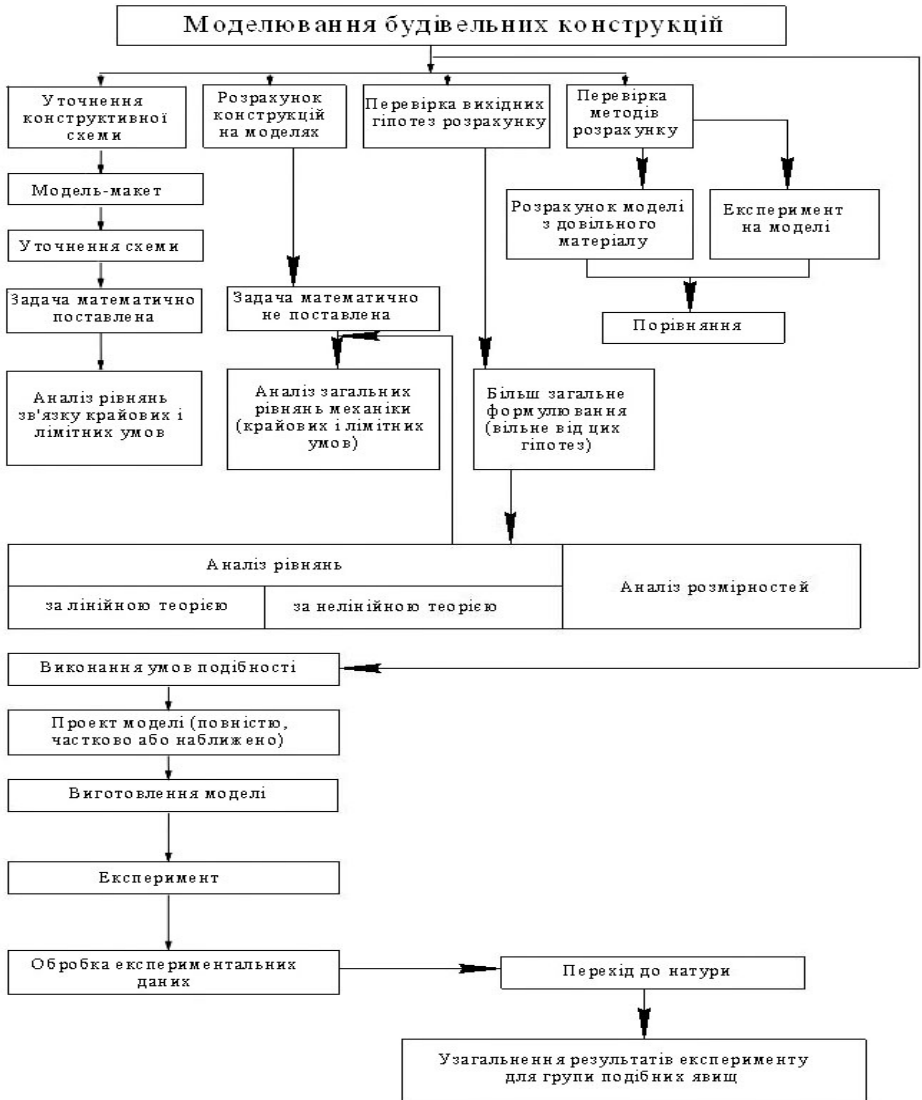


Рис. 14.1. Структурна схема моделювання

Метод ґрунтується на властивостях деяких матеріалів здобувати під навантаженням оптичну анізотропію і мати властивості подвійного променевого переломлення під час проходження променя поляризаційного світла. Коли промінь пронизує модель, яка піддається дії зусиль і виконана з оптично активного матеріалу, він розпадається на два з різними швидкостями розповсюдження. Ці промені під час проходження крізь модель нагромаджують оптичну різницю ходу  $\delta = n\lambda$ , де  $n$  – коефіцієнт пропорційності;  $\lambda$  – довжина хвилі джерела світла.

Світлові вектори двох променів коливаються у взаємно перпендикулярних напрямках, паралельних площинам головних напружень  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ . В аналізаторі поляризаційної установки промені складаються і на екрані спостерігається інтерференційна картина у вигляді кольорових повторювальних смуг – ізохром (у монохроматичному світлі картина смуг стає чорно-білою (рис. 14.2, а). Кількість смуг залежить від навантаження і дорівнює коефіцієнту пропорційності  $n$ , який характеризує стан моделі. Оптична різниця ходу, зумовлена заданим навантаженням і віднесена до довжини хвилі світла, називається порядком смуги для точки, яка розглядається в моделі напруження, пов'язана з оптичною різницею ходу, описується залежністю

$$\delta = n\lambda = ct(\sigma_1 - \sigma_2) = 2ct\tau_{\max}, \quad (14.16)$$

де:  $t$  – товщина виробу;  $c$  – оптична постійна матеріалу моделі.

У точках, де  $\sigma_1 = \sigma_2$  або  $\tau_{\max} = 0$ , спостерігаються темні плями, так звані особливі або ізотропні точки. Під час проходження плоскополяризаційного світла зі схрещеними поляроїдами на екрані поляризаційної установки з'являються ізокліни, які являють собою геометричні місця точок, у яких кути нахилу головних площин однакові.

Систему ізоклін, які відповідають різним кутам нахилу головних площин від  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$ , одержують синхронним обертанням поляроїдів полярископа відносно моделі. За допомогою деяких методів розділення різниці головних напружень, які ґрунтуються на залежностях теорії пружності, визначають нормальні і дотичні напруження (рис. 14.2, б). Просторову задачу в об'ємних моделях можна розв'язати, «заморожуючи» картини смуг, а також використовуючи складні моделі.

«Заморожування» використовують для збереження напружень і деформацій у моделі після зняття навантаження. Під час «заморожування» картин смуг моделі, яка виконана із фотоактивного мате-

ріалу, нагрівається до 115–120 °С, потім до неї прикладається навантаження, а температура за певним графіком знижується до 25 °С. Залежно від фотоактивності матеріалу «заморожування» деформацій, які виникають у розігрітій моделі під навантаженням, відбувається при 60–75 °С. Потім модель розрізають по площинах, в яких необхідно визначити напруження.

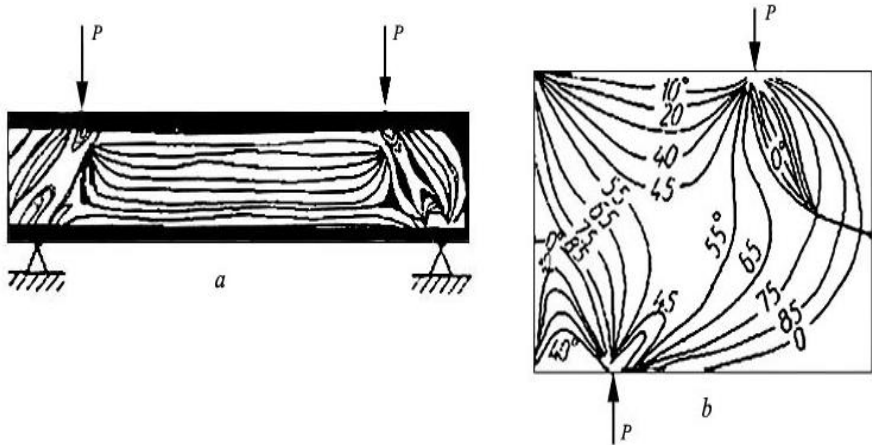


Рис. 14.2. Моделювання балки поляризаційно-оптичним методом:  
*a* – картина смуг (ізохром); *b* – ізокліни

Складені моделі виготовляють із оптично неактивного органічного скла, в яке вклеюють тонку пластинку оптично активного матеріалу. Напруження визначають під час просвічування всієї об'ємної моделі. Перехід під отриманих напружень, які виражені порядком смуг, до напружень у мегапаскалях можна здійснити тільки за відомої ціни смуги матеріалу моделі  $h$ , тобто її кількісним вираженням за тарованими зразками або із умов рівноваги, причому у методиці «заморожування» ціна смуги визначається при температурі заморожування. Прилади, які використовують у поляризаційно-оптичному методі, повинні визначити кут нахилу площин коливання поляризаційного світла, що проходить крізь модель, яка перебуває у плоско-напруженому стані, і оптичну різницю ходу. Найбільш розповсюджені два методи визначення різниці ходу: «метод смуг» і «метод компенсації».

Просвічуванням плоскої моделі в монохроматичному світлі не вичерпуються можливості оптичного методу. Часто просвічування моделі здійснюється в білому світлі. На екрані в такому разі замість темних і світлих смуг отримують кольорові смуги з неперервними переходами через кольори спектра. Існують способи просвічування

моделей з погашенням ізоклін. Відомі прийоми дослідження напруженого стану в просторових моделях шляхом «заморожування» оптичної анізотропії з подальшим розрізанням моделі на плоскі зразки.

У дослідженнях для фіксації і фотографування інтерференційної картини смуг та ізоклін використовують велику поляризаційно-оптичну установку Інституту машинознавства Російської академії наук – БНУ-ІМАШ-КБ-2. Вона має робоче поле поляроїдів Д-150 мм з монохроматичним джерелом світла від ртутної лампи СВДШ-150 з зеленим світлофільтром. Для фіксації картини смуг і зарисовки смуг та ізоклін в установці є фотокамери з діафрагмою і екран з матовим склом, на якому закріплюють папір.

Для точкового вимірювання оптичної різниці ходу  $\delta$  і параметрів ізоклін під час розділення напружень використовують координатно-снихронний поляриметр КСП-5 зі слюдяним компенсатором системи Краснова СКК-2, а також поляризаційний мікроскоп з компенсатором Берека МП-7. Вимірюючи різницю ходу цими приладами, застосовують метод компенсації, який точніший за метод смуг і рекомендується для точних вимірювань, особливо тоді, коли необхідно визначити тільки  $\tau_{\max}$ , і всі три складові напружень плоскої задачі, а також під час розв'язування просторової задачі фотопружності.

Сьогодні у промисловості виготовляють нові прилади: установки ППУ-2 у комплекті з полярометром, півавтоматично поляризаційна установка ИПЛ та ін.

#### **14.6. Загальні положення математичного моделювання будівельних конструкцій**

Математичним моделюванням називають метод вивчення фізичних явищ за допомогою моделей, який ґрунтується на ідентичності математичного опису процесів в оригіналі та моделі [124, 128, 222]. Розрізняють математичні моделі прямої і непрямої аналогії. Моделі прямої аналогії – це пристрої, які сприймають сигнали, вироблені на основі математичного методу розв'язання задачі в фізичній постановці. Моделі прямої аналогії використовують під час дослідження різних фізичних полів (наприклад, постійних магнітних). Електростатичне і стаціонарне електричні поля описуються одними і тими самими рівняннями Лапласа. Тому кожне із цих полів може бути математичною моделлю для двох інших. Ще універсальнішими є сітчасті моделі прямої аналогії, які побудовані на підставі математичного опису полів рівняннями у скінченних різницях. У такому разі вся область, в якій відбуваються модельовані

процеси, розбивається на елементарні об'єми, і для кожного із них будується електрична схема заміщення із  $R$ - $C$  або  $L$ - $C$  елементів, де  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – відповідно омичний опір, індуктивність і ємність конденсатора.

До моделей непрямої аналогії належать обчислювальні машини, які реалізують задані співвідношення послідовним виконанням окремих математичних операцій над машинними змінними. Залежно від способу подання й оброблення інформації розрізняють цифрові й аналогові обчислювальні машини. В аналогових (АОМ) оброблена інформація подається неперервно у вигляді змінюваних в часі фізичних (аналогових) величин. Конструкції АОМ із операційних блоків передбачають необхідність певного з'єднання їх для розв'язання конкретної задачі. У цьому сенсі АОМ є спеціалізованими машинами, оскільки призначені для розв'язування динамічних задач, де незалежною змінною є час перебігу процесів у моделі, а машинною змінною – напруження. Найбільш розповсюджені електронні ПК. Вони складаються із окремих електронних блоків (розв'язувальних підсилювачів), кожний із яких виконує математичні операції. Із таких підсилювачів складають структурні схеми так, щоб неперервний процес, який відбувається у схемі, був такий самий, як у досліджуваній системі, хоча фізична природа їх різна.

Подібність цих процесів суто математична і ґрунтується на аналогії диференціальних рівнянь, які описують їх у натурі і моделі. Незалежною змінною є час перебігу процесу в машині. Зміни напружень на виходах вирішуючих підсилювачів відповідають зміні залежних змінних у досліджуваній динамічній системі. При тому можна вивчити перехідні процеси у сповільненому або прискореному темпі.

АОМ досліджують процеси, які описуються диференціальними рівняннями у частинних похідних і діляться на АОМ загального призначення і спеціалізовані. За допомогою методів математичного моделювання можна розв'язати диференціальні рівняння, які мають вигляд систем диференціальних рівнянь першого порядку; диференціального рівняння вищого порядку; системи диференціальних рівнянь різних порядків. Такі рівняння можна розв'язати і за допомогою електронних цифрових обчислювальних машин. Інформацію у цифрову обчислювальну машину (ЦОМ) вводять у вигляді дискретних чисел і обробляють за допомогою програм, які забезпечують універсальність ЦОМ, оскільки під час переходу до іншої задачі змінюється тільки програма та вихідні дані. Широке застосування ЦОМ для розв'язання науково-технічних і економічних задач пояс-



нюється їх здатністю опрацювати великі масиви інформації і виконувати швидко і точно складні обчислення без втручання людини.

Варто зауважити, що ПК не «розв'язує задачу», вона допомагає тільки досліджувати різні варіанти конструкцій або споруд на основі розрахунків їх математичних моделей. Насправді, під час проектування інженерних споруд, машина самостійно не може задавати вхідні дані, перерахувати умови, за яких потрібно дослідити роботу споруди, визначити або знайти розумний компроміс між критеріями, що протирічають. Людина повинна сформулювати задачу, визначити кінцеву мету, дати математичний опис, виразити числовий алгоритм розв'язку задачі у вигляді послідовних операцій для обчислювальної машини (програму), налагодити програму. Після того машина розраховує, як правило, відразу декілька варіантів набору вихідних даних. Одержані результати мають обдумати проектувальники (обчислювачі) з метою аналізу та вибору найкращих параметрів конструкцій або споруди. Отже, він (ПК) фактично тільки надає технічну допомогу в розрахунках і передбачає результати нашого вибору.

#### **14.7. Математичні моделі прямої аналогії будівельних конструкцій**

Обговорюючи питання експериментальних методів замірювання деформації і напружень необхідно акцентувати увагу на різниці між механічними випробуваннями матеріалів та випробуванням конструкцій загалом [38, 64, 97, 124, 128]. Дослідження матеріалів здійснюється з метою визначення таких механічних характеристик, як межа текучості, міцності, модуль пружності тощо. Випробовують матеріали на зразках, розміри і форми яких можна варіювати залежно від вимірювальної апаратури і самих умов випробувань.

Коли ж говорять про випробування конструкції, то мається на увазі її міцність загалом, окремих вузлів або моделей. Таке випробування має за мету, з одного боку, перевірку точності виконаних розрахунків, а з іншого, перевірку правильності вибраних технологічних процесів виготовлення вузлів і здійснення монтажу, бо за недостатньо правильних технологічних прийомів можливе місцеве ослаблення конструкції.

Як вже зазначалось, під математичним моделюванням розуміють імітацію дослідного процесу або об'єкта, створення спеціальної моделі (аналога), в якій описується тими самими рівняннями, що й в оригіналі, але мають іншу фізичну природу. Дослідження процесів теплопровідності, розподіл напружень і деформацій у будівельних спорудах і конструкціях, пластових тисків, дебіту рідини

і газів називають дослідженням фізичних полів. Ці задачі вводяться до розв'язання таких рівнянь у частинних похідних або рівнянь математичної фізики (РМФ) [124, 128]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = 0 \text{ (рівняння Лапласа);} \quad (14.17)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = c\gamma \frac{\partial U}{\partial t} \text{ (рівняння Фур'є);} \quad (14.18)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = f(x, y, z) \text{ (рівняння Пуассона).} \quad (14.19)$$

Рівнянням Лапласа описуються ламінарний рух ідеальної, нестисливої рідини, стаціонарної дифузії, стаціонарні теплові поля. Рух ґрунтових вод, нестационарна фільтрація, нестационарні режими теплопровідності, рух стисливої рідини, різного роду коливні процеси описуються рівнянням Фур'є. Права частина рівняння Пуассона характеризує джерела або стоки всередині області, що досліджується. Розв'язок цих рівнянь разом з заданими крайовими умовами є важкою математичною проблемою. Сьогодні відомі методи, найчастіше вживані при розв'язуванні РМФ, до яких зарахуємо: метод розділення змінних, метод інтегральних перетворень, метод скінченних різниць, асимптотичні розклади, варіаційні методи. Однак бувають випадки, що ці методи не можуть бути застосованими з погляду практичних потреб оброблення результатів фізичного експерименту. Значно легше виготовити електричну модель, процеси у якій описуються тими самими диференціальними рівняннями, що й в оригіналі.

Створення електричних моделей ґрунтується на аналогії між методами механіки суцільного середовища й закономірностями протікання струму в електричних колах. У першому методі моделлю є поле електричного струму в суцільному струмопровідному середовищі. У другому – використовують електричні ланцюги з зосередженими параметрами; модель отримуємо у вигляді електричної сітки, яка ґрунтується на дискретному поданні елементарних об'ємів області, що моделюється за допомогою схем заміщення. Для моделювання у суцільному середовищі застосовують різні електропровідні матеріали, із яких найбільш розповсюджені електроліти й електропровідний папір. Під час моделювання фізичних полів використовують електроліти, провідність котрих можна змінювати у широких межах, міняючи концентрацію розчину. Такий метод моделювання полів називають методом електролітичної ванни.

Припустимо, необхідно визначити теплові втрати трубопроводів, які залежать від якості ізоляції, кількості труб і їх взаємного розташування в траншеї, оскільки при тому теплові витрати зменшуються завдяки взаємному підігріванню. Нехай, наприклад, необхідно визначити теплові витрати трубопроводу завдовжки 5 км, який із трьох труб діаметром  $d_1=100$  мм, кожна з яких прокладена на віддалі  $m_1 = 150$  мм на глибині  $h = 80$  см у групі з питомою теплопровідністю  $\gamma$ . Моделлю трубопроводів є металічні трубочки, поміщені в електродит так, щоб їхнє взаємне розташування і рівень електроліту були геометрично подібні до розташування трубопроводів у траншеї, Вимірюючи напруження на трубці і струм, який протікає її робочою частиною, визначають електричний опір протіканню струму:

$$R_2 = U / I . \quad (14.20)$$

Опір, який ґрунт чинить розтіканню теплового потоку, обчислюється за формулою

$$R_1 = R_2 \cdot m_R , \quad (14.21)$$

де  $m_R$  – масштаб опорів.

Електричний питомий опір виразиться в [Ом·см], тобто масштаб опорів

$$m_R = m_d / \lambda , \quad (14.22)$$

де:  $\lambda$  – масштаб лінійних розмірів;  $m_d$  – відношення питомої провідності електроліту до питомої теплопровідності ґрунту.

Якщо відома різниця температур теплопроводу та ґрунту, легко можна обчислити теплові втрати. У нашому випадку приймемо діаметр трубок моделі  $d_2 = 10$  мм, тоді масштаб лінійних розмірів  $\lambda = d_1 / d_2 = 10$ . В електроліт з питомою провідністю  $\rho$  трубки потрібно опустити на глибину  $h_2 = 8$  см при віддалі між ними  $m_2 = 15$  см, що моделює ділянку трубопроводу завдовжки  $l_1 = 5$  м, і теплові втрати визначаються для цієї ділянки. Для встановлення теплових втрат на 5 км одержані результати потрібно збільшити у  $10^3$  разів.

Коефіцієнт екранування визначається на моделі зі співвідношення

$$R = R_1 / R_n , \quad (14.23)$$

де:  $R_1$  – опір розтіканню електричного струму однієї трубки;  $R_n$  – те саме для труби, яка розташована в пучку труб.

Поряд з методом електролітичної ванни застосовують метод твердих моделей з використанням електропровідного паперу. Під час проектування будівельних конструкцій доводиться вивчати ро-

боту різних елементів, що перебувають у плоскому напруженому стані. Замість дослідження розподілу суми головних напружень у плоскій моделі достатньо досліджувати розподіл потенціалу в моделі, виготовлений із електропровідного матеріалу зі збереженням відповідних граничних умов. Такими матеріалами можуть бути електропровідний папір, металічна фольга. Електропровідний папір складається із волокон целюлози, між якими розташовані частинки, які проводять струм матеріалу. У вітчизняній промисловості випускають папір з питомим поверхневим опором від декількох десятків Ом до декількох МОм. Високоомні сорти паперу створюють, додаючи у паперову масу сажу, а низькоомні – графіт.

Методика випробування на моделях із електропровідного паперу і всі необхідні пристосування на достатньо високому технічному рівні розроблено в лабораторії моделювання й експериментальних методів розрахунку ЛенЗНПЕП. Метод відрізняється простою задання граничних умов і не вимагає складного обладнання. За його допомогою можна визначити концентрацію напружень біля отворів (рис. 14.3).

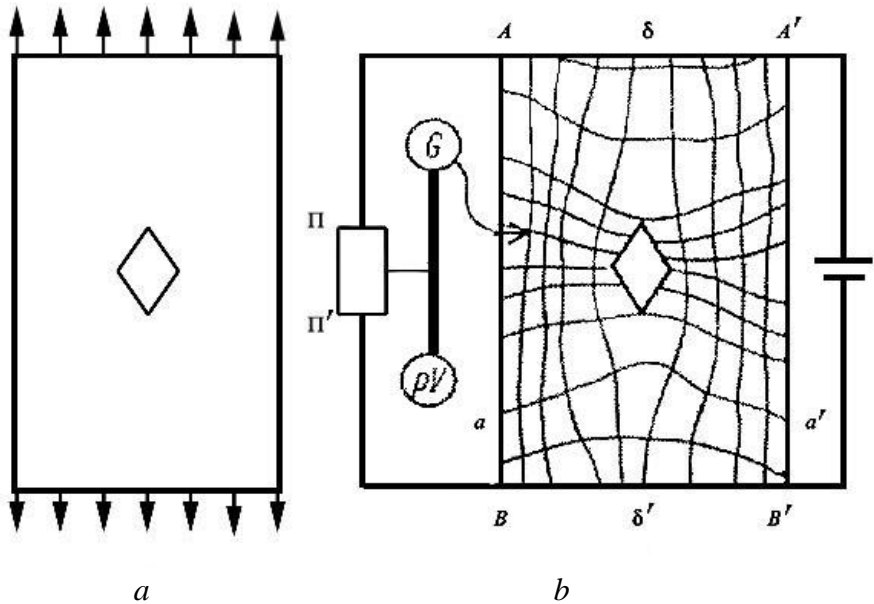


Рис. 14.3. Визначення концентрації напружень у пластині; *a* – під дією розривних сил; *b* – модель пластини

Для цього із електропровідного паперу вирізають контур, геометрично подібний до досліджуваної пластини з ромбоподібним

вирізом. До країв моделі  $AA'$  і  $BB'$  підводиться напруження постійного струму. За допомогою дільника напружень  $RP$ , вольтметра  $PV$ , гальванометра  $G$  і щупа на папері одержують точки рівного потенціалу. З'єднуючи їх між собою, одержують лінії рівних потенціалів  $a-a'$ . Побудувавши систему ліній, ортогональну до ліній екіпотенціального поля, одержують силові лінії  $\delta-\delta'$ , за густиною яких судять про концентрацію напружень у пластині.

Стержневі системи типу балок, ферм тощо можна моделювати за допомогою електричних сіток методом прямих аналогій. Розглянемо принципи побудови такої моделі на прикладі згинальної балки (рис. 14.4).

Реакції двох опор балки  $P_A$  і  $P_B$  визначають за формулами

$$P_A = \frac{P_1(l_2 + l_3) + P_2l_3}{l_1 + l_2 + l_3}; \quad P_B = \frac{P_1l_1 + P_2(l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3}. \quad (14.24)$$

Для електричної схеми, наведеної на рис. 14.4,  $d$ , на основі закону Кірхгофа можна записати

$$I_A R_1 + (I_A - I_1)R_2 + (I_A - I_1 - I_2)R_3 = 0; \quad I_A = \frac{I_1(R_2 + R_3) + I_2R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad (14.25)$$

$$I_B R_3 - (I_B - I_2)R_2 + (I_B - I_1 - I_2)R_1 = 0; \quad I_B = \frac{I_1R_1 + I_2(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad (14.26)$$

Оскільки рівняння електричної схеми аналогічні рівнянням опорних реакцій балки, прийняту електричну схему можна розглядати як аналог балки. Якщо в електричній схемі струми  $I_1$  і  $I_2$  пропорційні силам  $P_1$  і  $P_2$

$$I_1 = j_T P_1, \quad I_2 = j_T P_2, \quad (14.27)$$

а опори – довжинам ділянок

$$R_1 = j_c l_1, \quad R_2 = j_c l_2; \quad R_3 = j_c l_3, \quad (14.28)$$

то для визначення реакцій опор балки достатньо змінити точки  $I_A$  і  $I_B$ . Тут  $j_T$  – перехідний масштаб за струмом;  $j_c$  – перехідний масштаб за опором.

Визначати реакції опор такої балки на електричній моделі нецільно, але така схема може бути частиною електричної моделі складнішої стержневої системи.

Розглянемо моделювання нерозрізних балок на жорстких опорах. Як відомо, нерозрізну балку можна подати як сукупність статично визначених однопрогонових балок з додатковими моментами

у місцях спряження, рівними за величиною і протилежними за знаком. Причому кути повороту кінцевих перерізів для кожної однопрогонової балки повинні бути дорівнювати кутам повороту перерізів у сусідніх балках у місцях спряження.

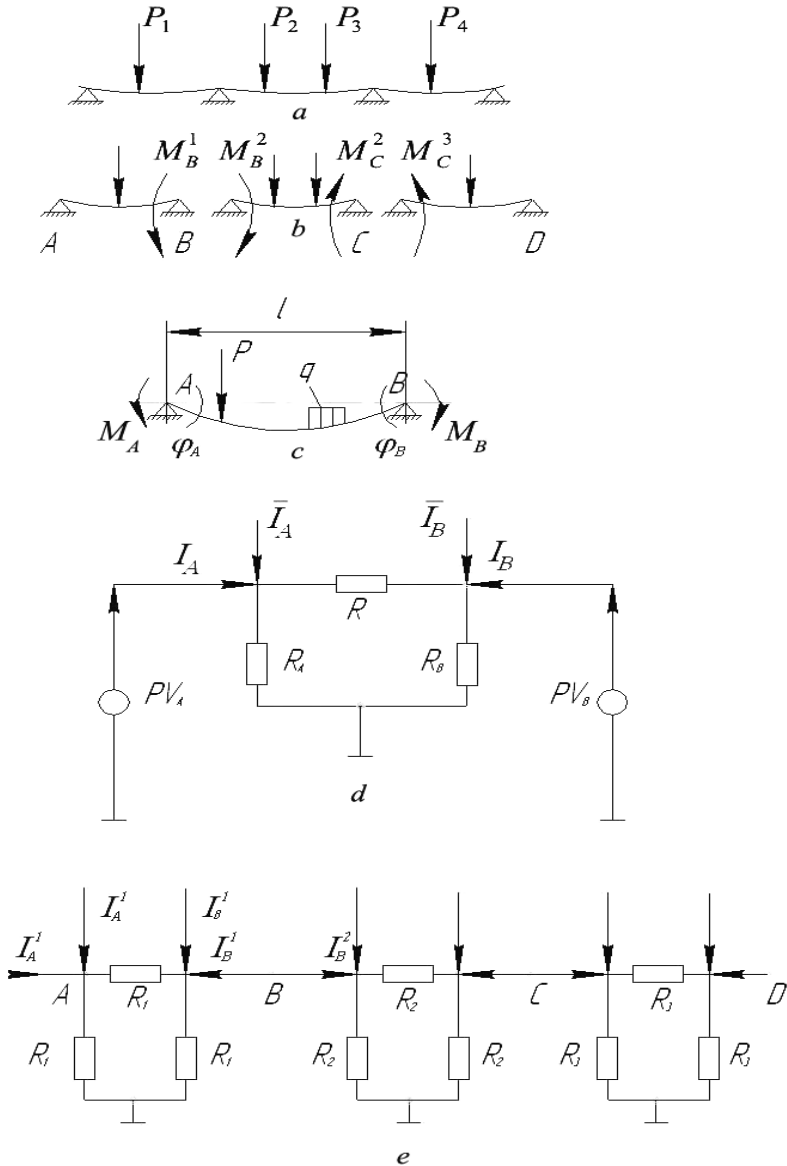


Рис. 14.4. Моделювання згинальних балок: *a-c* – схеми навантаження нерозрізної балки; *d* – електричний аналог (модель) однопрогонової балки; *e* – те саме, багатопрогонової

Для навантаженої балки на двох опорах (рис. 14.4, с) справедливі співвідношення

$$M_A = \frac{2EI}{l}(2\varphi_A + \varphi_B) + \bar{M}_A; M_B = \frac{2EI}{l}(2\varphi_B + \varphi_A) + \bar{M}_B, \quad (14.29)$$

де:  $M_A, M_B$  – моменти в точках  $A$  і  $B$ ;  $\varphi_A, \varphi_B$  – кути повороту перерізів у точках  $A$  і  $B$ ;  $EI$  – жорсткість балки;  $l$  – довжина прогону;  $\bar{M}_A, \bar{M}_B$  – кінцеві моменти для тієї самої балки за умови  $\varphi_A = \varphi_B$ , тобто для жорсткого защемлення кінців.

Розглянемо електричну схему чотириполосника, яка наведена на рис. 14.4, d (П-подібна схема заміщення). За першим законом Кірхгофа можна записати

$$I_A = \frac{V_A - V_B}{r} + \frac{V_A}{r} + \bar{I}_A; I_B = \frac{V_A - V_B}{r} + \frac{V_B}{r} + \bar{I}_B; \quad (14.30)$$

$$I_A = \frac{2V_A - V_B}{r} + \bar{I}_A; I_B = \frac{2V_B - V_A}{r} + \bar{I}_B. \quad (14.31)$$

Зіставляючи рівняння моментів з рівняннями електричного ланцюга, впевнюємось, що у разі зберігання пропорційності між моментами і струмами ( $M_A \sim I_A, M_B \sim I_B$ ), кутами повороту і напружками ( $\varphi_A \sim U_A, \varphi_B \sim U_B$ ) ці рівняння будуть аналогічні. Отже, П-подібна схема електричного чотириполосника може бути схемою-аналогом згинального стержня.

Для переходу від заданого стержня до його електричного аналога потрібно ввести перехідні масштаби за струмом  $j_T = I_k^i / M_k^i$  і за напруженням  $j_n = U_n / \varphi_k$  де  $n$  – індекс вузла;  $i$  – номер стержня.

Оскільки за законом Ома  $r = U / I$ , то перехідний масштаб за опором  $j_c = I_n / I_r$ , або  $j_c = r \frac{2EI}{l}$ . Окрім того, знаки для змінних на кінцях

$A$  і  $B$  повинні бути протилежні. Для моделювання нерозрізної балки (рис. 14.4, d) необхідно з'єднати П-подібні чотириполосники відповідно до заданої схеми з'єднання стержнів. При цьому рівність напружень у точках з'єднання чотириполосників встановлюється автоматично. Відповідно до закону Кірхгофа забезпечується рівність струмів  $I_B^1 = -I_B^2$  і подібні йому рівняння у всіх точках з'єднання. Отже, для визначення опорних моментів і кутів повороту достатньо виміряти струми та напругу у схемі аналога. Машини ЕМСС (елект-

ричні моделі стержневих схем) зберігають набір П- і Т-подібних систем, із яких можна скласти аналоги різних стержневих систем.

## 14.8. Висновки до розділу 14

Основна задача дослідників будівельних конструкцій це задача моделювання будівельних конструкцій яка описана у цьому розділі. Зокрема, наведено загальні положення і класифікація методів моделювання будівельних конструкцій, основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій, відомості про теорію подібності та розмірності будівельних конструкцій, специфіку виготовлення фізичних моделей будівель і споруд, модельні фізичні дослідження та загальні положення математичного моделювання будівельних конструкцій і математичні моделі прямої аналогії будівельних конструкцій. Результати досліджень моделювання та їх аналіз дозволили сформулювати такі висновки:

1. Суть моделювання – це дослідження які виконують на моделях, цей метод один із найраціональніших для спостережень. Модель будівельної конструкції – це копія споруди. На основі багаторічного досвіду досліджень вдалось сформулювати основні завдання. Зокрема, вивчають НДС за різних факторів впливу на споруду; досліджують роботу конструкції і схеми та механізми руйнування; перевіряють і уточнюють закладені в теорію вихідні умови, гіпотези і припущення; визначають достовірність теоретичних розрахунків вцілому; встановлюють зусилля в складних спорудах; вивчають нові конструкції та матеріали.

2. Сформульовано основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій. Переважно фізичне моделювання складається з двох етапів – теоретичне відтворення та виготовлення моделей і спостереження на них. Добрі і детально наведені відомості про теорію подібності та розмірності фізичного моделювання будівельних конструкцій. Проілюстровано математичний алгоритм подібності.

3. Наведено дані про специфіку виготовлення фізичних моделей будівельних конструкцій і споруд. Зокрема, звернуто увагу на зменшення масштабу виготовлення маленьких моделей, коли виготовлення обмежується технологічними труднощами. Наведені конкретні умови подібності, які мають дотримуватися для бетону, кам'яної кладки і інших аналогічних матеріалів.

4. Представлено результати досліджень модельних фізичних спостережень на підставі яких встановлено такі етапи досліджень:



підготовчого, постановки задачі дослідження, встановлення умов подібності моделі і натури, проектування експерименту на моделі, виготовлення моделі, пристосовлень, монтажу вимірювальної апаратури, виконання експерименту та обговорення експериментальних даних, перехід від моделі до натури та аналіз результатів і складання рекомендацій. Послідовність моделювання представлена на стандартній схемі моделювання. Наведено приклад моделювання балки поляризаційно-оптичним методом.

5. Сформульовано загальні положення математичного моделювання будівельних конструкцій. Розглянуто також математичні моделі прямої аналогії будівельних конструкцій. Зокрема, наведено рівняння Лапласа, рівняння теплопровідності Фур'є та рівняння Пуассона, які описують відповідні реальні процеси. Як приклад наведено приклад визначення концентрації напружень у пластиків, та моделювання стержневої системи типу балок. Зокрема, наведено моделювання згинальних балок.

## Загальні висновки

У даній праці на основі узагальнення даних науково-технічних джерел, а також отриманих результатів при експериментальних і теоретичних дослідженнях протягом тривалого часу та читання лекцій на будівельних факультетах тривалий період за напрямком дослідження і випробування, та випробування різних рівнів на заводах будівельних матеріалів і конструкцій західного регіону України протягом 30 років – узагальнено основні результати найбільш ефективних напрямків підвищення міцності, надійності і довготривалості конструкційних матеріалів та конструкцій будівель і споруд при їх експлуатації та ремонтно-відновлювальних роботах. Зокрема, стандартизовано та уточнено низку методів дослідження і випробування матеріалів та конструкцій будівель і споруд. Розроблено низку стендів та приспособлень, які захищені патентами. Створено нові типи давачів (сенсорів) тиску, деформацій та температури і вологості, які описані в даній книзі і захищені патентами. На підставі тривалих теоретичних і експериментальних досліджень, розроблено низку методичних рекомендацій в тому числі на засадах механіки руйнування, які описані в даній книзі. Важливими питаннями при експлуатації бетонних, залізобетонних конструкцій є розкриття і підростання тріщин в часі під навантаженням та проблема заповнення їх інекційними матеріалами. Значну увагу приділено теоретичним засадам математичного та фізичного моделювання при випробуванні складних споруд, особливо протяжних мостів. Результати багаторічних досліджень і випробувань конструкцій будівель і споруд можна підсумувати в таких узагальнених висновках.

1. На підставі аналізу науково-технічних джерел, сформульовано мету методів теоретичних і експериментальних досліджень та випробувань будівельних матеріалів та конструкцій будівель і споруд. Встановлено основні завдання досліджень та сформульовано три основні задачі випробувань, які описані в цьому розділі. Виконано ґрунтовний аналіз методів і засобів випробувань будівельних матеріалів і конструкцій. Розглянуто і з'ясовано основні поняття метрології та методологію експериментальних досліджень. Зокрема, з'ясовано загальні положення та необхідність контролю якості матеріалів конструкцій і споруд основне надійність та методику оцінки надійності будівель і споруд. Ґрунтовно описано історичний розвиток методів дослідження та випробування матеріалів будівель і споруд за кордоном і на Україні та наукові школи видатних вчених.

2. На підставі багаторічних експериментальних випробувань наведено результати і основні способи випробувань конструкцій за видами навантажень на статичні і динамічні та за величиною навантаження на експлуатаційне і руйнівне. Залежно від мети досліджень, наведено аналіз науково-дослідних, контрольних, сертифікаційних, приймальних та експлуатаційних випробування для яких описані силові дії та способи створення навантажень. Описані прилади контактні та дистанційні та пристосування для статичних і динамічних випробувань конструкцій, зокрема, мостів. Розглянуто основні схеми випробування та розташування приладів з врахуванням трьох основних вимог – це мінімальна кількість завантажувальних елементів, повинні бути охоплені всі несучі елементи та вибрати елементи з чіткою схемою статичного опирання і закріплення.

3. Виконуючи дослідження складних будівель і прогонових споруд та конструкцій сакральних і унікальних споруд є недоцільним випробування руйнівним методом. У цьому розділі описано та стандартизовано визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і елементів конструкцій, які досліджували тривалий час різними неруйнівними методами. Потрібно відзначити, що ці методи мають деякі переваги над руйнівними, зокрема, не порушують експлуатаційних властивостей матеріалів, зберігають цілісність контролюючої конструкції, дають можливість багаторазового випробування в часі, порівняно мала трата часу на проведення досліджень і дають можливість визначення потрібної характеристики у будь-якій точці. На основі досліджень сформульована схема класифікації неруйнівних методів, які викладені в різних розділах фізики та сформована схема комбінованих методів дубляжу для надійності досліджень. Описано механічні методи визначення поверхневої твердості та інші методи, що базуються на висмикуванні, на відриву та метод сколювання.

4. Виконано дослідження та опрацьовані методи дослідження міцності конструкцій та виявлення дефектів у них, що базуються на розповсюдженні хвиль. Сучасні досягнення атомної фізики дали змогу створити радіаційні методи для встановлення механічних характеристик матеріалів і конструкцій, які сформульовано і наведено у даному розділі. А для визначення дефектів і різного роду включень, пустот, розшарування та дефекти зварювання потрібно використовувати добре опрацьовані і адаптовані механічні та електромагнітні методи. Електромагнітні методи базуються на електромагнітній індукції та поглинання електромагнітних хвиль. Також сфо-

рмультвовані та описані оптичні методи, що базуються на взаємодії світла з поверхнею тіла або з дефектом поверхні. Зокрема, дали добрі результати для вимірювання довжини повільного росту тріщини. Грунтовно проаналізовані інші неруйнівні методи та наведені приклади їх використання, зокрема капілярний метод отримав застосування для виявлення невидимих тріщин.

5. Обладнання є основним інструментом дослідження лабораторій. Зокрема, преси призначені для механічного стискання зразків матеріалів, які виконані з гідравлічним або механічним приводом (жорсткі). Габарити для них конструкцій є значними, що не дозволяє використання універсальних машин і пресів, тоді використовують різного виду стенди розбірні і стаціонарні з вертикальним і горизонтальним розташуванням конструкцій при випробуванні. До нестаціонарного обладнання потрібно віднести і силову плиту. На основі багаторічних випробувань та досліджень міцності і деформативності конструкцій на тимчасових, розбірних, спонукало до розробки універсального стенда для випробування балкових залізобетонних конструкцій та стінових панелей ВСП-1. Тут же описані і створені стенди контролю якості стінових панелей СНК-1, СНК-2 та контролю якості плит перекриття СНК-3 та контролю якості довговимірних конструкцій СНК-4. Створення також устаткування для підбору режимів теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів та автоматизований стенд для випробування залізобетонних зразків та конструкцій. Наведено також конструкцію силової плити у цьому розділі.

6. У п'ятому розділі наведено результати досліджень давачів тиску і деформації в будівельних конструкціях. Зокрема, наведено нові типи багатофункціональних сенсорів створених на основі досліджень ниткоподібних кристалів. Описано конструкцію давача та його градувальні характеристики при різних рівнях деформації. Потрібно звернути увагу на створену конструкцію чутливого сенсора для одночасного вимірювання магнітного поля і температури та градувальні характеристики терморезистора і магніторезистора. Розроблено також одноелементний сенсор для вимірювання температури і магнітного поля та описані його характеристики. Розроблені і описані тут пристрої для досліджень тензорезистивних давачів вимірювання деформацій, побудованих на основі ниткоподібних кристалів в основу яких покладено тензорезистивний ефект, перетворювачем механічного сигналу якого є пружний балковий елемент та наведено деформувальний пристрій. У цьому розділі ро-

зглянуто також нові типи тензорезистивних давачів з напівпровідникових кристалів, зокрема, дослідження кристалів із кремнію, телуру  $Te$  і, селену  $Se$  і, з'ясовані можливості їх застосування.

7. У шостому розділі ґрунтовно протягом тривалого часу досліджено експериментальні методи дослідження росту тріщин, зокрема, у загальних відомостях показано, що експериментально механіка руйнування (ЕМР) досліджує властивості конструкційних матеріалів, тобто опір їх руйнуванню. Встановлено, для такого матеріалу як бетон, залежності між навантаженням, що діє на тіло, часом і параметром руйнування, найчастіше – це довжини тріщини та її розкриття, що становить експериментальну задачу механіки руйнування. Показано, що методологічна і примірна база ЕМР використовує такі методи та прилади, як в дефектоскопії, але завдання ЕМР та дефектоскопії різні, хоча у приладах дефектоскопії та ЕМР використовуються одні і ті ж фізичні явища. Встановлено також методи, що базуються на фізичних законах, які описують НДС в околі тріщин та апробовані авторами на різних матеріалах, в тому числі і на бетоні, - метод пружної податливості, ультразвуковий метод, метод різниці електричних потенціалів, метод акустичної емісії і ін. При визначенні критеріїв механіки руйнування в дослідках для бетонів використовували і оптичні методи, та методика оптичного дослідження наведена в цьому розділі. Для встановлення довжини тріщини і її підростання у конструкційних бетонах використовували і фрактографічні методи дослідження поверхні злому зразків. Розроблено спосіб вимірювання розкриття та довжини тріщини у залізобетонних конструкціях, зокрема, описано методику ілюструючи її на залізобетонному зразку з надрізом і котушками вимірювання довжини тріщини, наведено також схеми підключення приладів до пристрою вимірювання довжини і розкриття тріщини.

8. На основі багаточисельних випробувань наведених у працях та аналізу науково-технічних джерел стандартизовані зразки та способи їх виготовлення. Зокрема, досліджено вплив масштабного фактору, границя міцності на стиск, гарантована міцність заданого нормами класу бетону. Встановлено допуски при виготовленні зразків, ступінь ущільнення бетонної суміші і інші чинники. Встановлено вимоги до зразків. Багаторічний досвід використання бетону і залізобетонних конструкцій дав можливість стандартизувати обладнання, прилади і засоби дослідження бетонних та залізобетонних зразків і конструкцій. Встановлено вимоги до обладнання та приладів. Детально описано підготовку і випробування зразків, зокрема,

визначення усадки бетону, повзучості при навантаженні та деформації після дії.

9. Стандратизовано методи і засоби обробки результатів випробувань, визначення міцності, тріщиностійкості та деформаційних і експлуатаційно-механічних характеристик бетону. Встановлено довговічність армоцементу та сформульовано і описано фактори, що впливають на його корозійну стійкість. Постійні дослідження та випробування дали змогу визначити механічні характеристики сталі, зокрема, арматури для залізобетонних конструкцій. Розглянуто і описано у цьому розділі методику визначення механічних характеристик цегли керамічної, зокрема, встановлено границі міцності на стиск та на згин. Також сформульовано та описано методику визначення механічних характеристик деревини, зокрема, встановлення опору деревини стиску поперек та вздовж волокон, границю міцності при згині.

10. На основі аналізу науково-технічних джерел та багаторічних досліджень у цьому розділі адаптовано критерії і засади експериментальної механіки руйнування стосовно визначення характеристики тріщиностійкості бетонів. Сформульовано мету і завдання та встановлено науковий світовий рівень створених методичних рекомендацій. Обґрунтовано їх необхідність та опрацьовано характеристики методів стандартизації. Вибрано найсуттєвіші показники порівняння в результаті сформульовано загальні положення та зразки для визначення характеристики тріщиностійкості бетонів. Розроблено обладнання і створено методику проведення випробувань і обробки одержаних результатів, зокрема, силові і енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів. Створено методику визначення характеристик під час рівноважних і нерівноважних випробувань з фіксуванням розмірів зростаючої магістральної тріщини.

11. Розроблено та опробовано рекомендації на випробування зразків при складному напруженому стані під час одночасного розтягу та закруту. Наведено також методику визначення тріщиностійкості бетону під час змішаного руйнування, за механізмом нормального відриву і поздовжнього зсуву. Описано розроблені рекомендації для випробування бетону на кліматичну тріщиностійкість і побудована номограма залежності деформацій  $\varepsilon$  від числа циклів. Представлено та описано результати досліджень визначення розрахункових параметрів руйнування бетонів, що дисперсно армовані базальтовим волокном. Одержано залежності на стиск і розтяг та

залежність між розкриттям  $\delta_c$  у вершині тріщини та величини  $v$ . Представлено схему розкриття тріщини під час триточкового згину та одержана формула для  $K_1$ . Описано експериментальну методику прецезійного знаходження довжини тріщини і деформаційних характеристик тріщиностійкості бетонів та одержано формулу для  $\delta_k$  методом скінченних елементів апроксимуючи результати досліджень.

12. Натурні обстеження необхідні для визначення реального стану матеріалів, конструкцій і споруд у зв'язку із фізичним і моральним старінням, а довготривалі випробування для визначення дійсної роботи і удосконалення методів розрахунку та конструювання і виявляти впливи різних факторів на будівлю. На основі тривалих досліджень сформульовано і описано типові і найбільш ймовірні місця впливу цих факторів та для довготривалих досліджень розроблені відповідні способи установки приладів на конструкціях. На основі узагальнення результатів обстеження і випробування основ і фундаментів є дуже важливою задачею, так як від тиску основ і фундаментів залежить надійність всієї будівлі чи споруди. Під час досліджень основ і фундаментів необхідно встановити всі фактори, які наведені в цьому розділі. На підставі довготривалих досліджень розроблено основні методи вимірювання тисків і напружень у ґрунтах за допомогою різних месдоз. Детально описано вимірювання деформацій і фільтрації ґрунтів та їх переміщення.

13. Мостові конструкції експлуатуються у складних умовах, тому потрібні їх періодично досліджувати для гарантії надійної, безпечної та безаварійної експлуатації. За період багаторічних досліджень та обстеження мостів, які описані у працях авторів, зокрема, обґрунтовано виконувати в три етапи дослідження, які описані в цьому розділі. Встановлено проводити періодичні огляди двох видів, післяпаводкові та післяремонтні та спеціальні огляди потрібно, щоб виконували спеціалізовані організації. На підставі багаторічних досліджень розроблено програму статистичних випробувань, яка включає мету і задачі випробувань. Зокрема, авторами представлено статистичні випробування низки мостів, показано установку випробувального навантаження при різних схемах завантаження та різні схеми установки прогиномірів і тензорезисторів. Сформульовано також мету і задачі динамічних випробувань мостів – це визначення величини динамічної дії, що створюється рухомими плитними навантаженнями та встановлення основних динаміч-

них характеристик споруди – це частоти і форми власних коливань. Представлено та описано реальні динамічні випробування низки мостів. Встановлено горизонтальну дію на міст автомобіля під час динамічних випробувань та описана робота вібраційної машини для випробування прогонових будов мостів.

14. Важливим моментом у випробуванні мостів є обробка і аналіз результатів обстеження та випробування мостів. Зокрема, необхідно скласти відомість дефектів за елементами споруди і дати оцінку за впливом на довговічність та на експлуатаційні якості споруди і комфорту руху транспорту і пішоходів. Розроблено і наведено залежності для визначення прогинів, коефіцієнт  $K$ , який залежить від місця заміру прогинів і виду завантаження. Представлено приклад поперечного перерізу поширення накладною плитою прогонової будови моста, схеми напруженого стану перерізу при дії згинальних моментів і нормальної сили з відповідними розрахунковими залежностями. Представлено і описано основні види віброграм при динамічних навантаженнях. Наведено методику дослідження мостів у лабораторіях. Зокрема, описано конструкцію моделі та геометричні розміри прогонової будови та наведено перехід зусиль до пружної споруди за теорією розширеної подібності. Представлено схему стенда для випробування крупномасштабних моделей прогонових будов мостів, конструкції дослідних зразків та схему стенда для випробування мостових балок довжиною 24 м і випробування мостів з руйнуванням конструкцій.

15. Для випробування і дослідження будівельних матеріалів і конструкцій дуже важливе місце займають методи дослідження теорії ймовірності та математичної статистики. Зокрема, це теорії і закони неперервних випадкових величин та дискретні розподіли випадкових величин. Встановлення термінології ймовірності, дискретної випадкової величини, закони розподілу ймовірної випадкової величини. Встановлено, що функція розподілу дискретної випадкової величини є ступінчастою, користуючись такою функцією конструювати апарат математичної статистики є складною задачею. Тому задану гістограму апроксимують неперервною функцією, яку називають кривою розподілу. Розглянуто низку законів неперервного розподілу випадкових величин, які описані відповідними закономірностями та з ілюстраціями на прикладах. Також наведено дискретні розподіли випадкових величин, які найчастіше зустрічаються з конкретними прикладами їх застосування.



16. На основі законів розподілу описаних в цьому розділі сформульовано основні поняття теорії математичного планування експерименту. Зокрема, наведено загальні відомості про плановий математичний експеримент, принципи кодування факторів, побудову регресивних рівнянь, умови проведення дослідів та аналіз результатів проведених дослідів. Наведено приклад зображення трифакторного експерименту і розглянуто матрицю планування для дробної репліки експерименту. Створена методика планування експерименту передбачає планування експерименту у два етапи: на першому етапі проведення відсіюючих експериментів та покрокове дослідження за певними факторними планами дробними репліками, за моделлю ранжують фактори, які в неї входять. У розділі детально описано планування експерименту. Зокрема, як приклад, наведено план відсіюючих експериментів, типовий план експерименту, об'єм експерименту залежно від кількості факторів та план стратегії експерименту і відповідні залежності для визначення коефіцієнтів регресії у відповідних моделлях. Щоб встановити як впливає той чи інший фактор на міцність матеріалу чи конструкцію необхідно проведення кореляційно-регресивного аналізу приклад якого наведено у даному розділі та описана термінологія (КРА). Наведено критерії узгодженості, які найчастіше використовуються при математичному плануванні експерименту і при оцінці методів дослідження теорії ймовірності та математичної статистики – це, такі: критерій Пірсона  $\chi^2$ , критерій Колмогорова, критерій Фішера та критерій Стюдента, для яких наведені конкретні залежності та алгоритми використання.

17. Сформульовано основні методи моделювання та аналіз систем. Зокрема, розглянуто суть методів моделювання й галузь їх використання. Наведено найбільш широко розповсюджені моделі, це функціональні, економічні, інформаційно-процедурні і що вони описують або визначають певні показники чи зміст-формат і швидкість потоку інформації. Розрізняють два види моделей, детерміновані і недетерміновані і технічне моделювання використовують під час вибору конструкцій споруди. Математичні моделі в основу яких покладено формально-логічний апарат математики, показано їх універсальність, які описують явища або систему утворюють імітаційну моделюючу систему. Для аналізу таких систем можна використовувати моделювання на ПК, яке має значні переваги. Розроблено основні критерії які здійснюють моделювання в три етапи. Метод статистичних випробувань використовують, коли класичні методи

математики не завжди придатні. Тоді застосовують метод статистичного моделювання на ПК, який отримав назву Монте-Карло. Суть цього методу проілюстровано на прикладі. Розглянуто основні етапи побудови моделі та формулювання її задуму. Розроблено блок-схему формування на ПК псевдовипадкових чисел і подання їх у різних системах, описано також метод Неймана та за дискретними законами.

18. Суть моделювання – це дослідження на моделях. Цей метод один із найпоширеніших для спостережень. Модель будівельної конструкції – це копія споруди. На основі багаторічного досвіду досліджень вдалося сформулювати основні завдання. Зокрема, вивчають НДС за різних факторів впливу на споруди і досліджують роботу конструкції, схеми та механізми руйнування; перевіряють і уточнюють закладені в теоріях вихідні умови, гіпотези і припущення; визначають достовірність теоретичних розрахунків в цілому; встановлюють зусилля у складних спорудах; вивчають нові конструкції та матеріали. Сформульовано основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій. Переважно фізичне моделювання складається з вступних етапів: теоретичного відтворення та виготовлення моделей і спостереження на них. Наведено відомості про теорію подібності та розмірності фізичного моделювання. Розглянуто специфіку виготовлення фізичних моделей будівельних конструкцій і споруд, та звернуто увагу на зменшення масштабу виготовлення маленьких моделей, коли виготовлення обмежується технологічними труднощами. Представлено результати досліджень модельних фізичних спостережень сформульовано низку пропозицій. Сформульовано загальні положення математичного моделювання будівельних конструкцій. Розглянуто також математичні моделі прямої аналогії будівельних конструкцій. Наведено рівняння Лапласа, Фур'є та Пуассона, які описують реальні процеси.

## Список літератури

1. А. с. 1264070 СССР, МКИ 4 G 01 №33/33. Способ контроля за развивающейся трещиной в бетоне / К.Л.Ковлер – Опубл. Бюл.№38.
2. А. с. 1383203. Стенд контроля качества строительных изделий/ В.А.Сафаро, Г.Н.Собко и др. – Опубл. .86, Бюл. №11.
3. А.С. 1201756 СССР, МКИ G01 №29/04. Устройство для неразрушающего контроля напряженного состояния пролетных строений и опор мостов / А.А.Емирсон, Г.Б.Муравил. – Опубл. 16.02.84 Бюл. №48.
4. А.с. 1329334 СССР. Кл. G01 К 7/00. Полупроводниковый датчик температуры/ И.Д.Гортынская, С.С.Варшава. – Опубл. Бюл. № 29.
5. А. С №1506330 стенд для испытания балок на прочность / И. И. Лучко, Я. Л. Иваницкий, И. П. Белый. – опубл. 7.09.89, Бюл. №33.
6. А.с. 1717371. Камера для тепловой обработки бетонных образцов/ В.А.Сафапов, И.Г.Артым и др. – Опубл. .92., Бюл. №9.
7. А.С. 2443765 СССР, МКИ G01 №29/04. Акустический способ исследования прочностных характеристик материалов / А.С.Дурасов, В.П.Лунояков, Р.Г. Гумеров. – Опубл. 4.01.77.
8. **Абовский Н. П.** Вариационные принципы в теории упругости и теории оболочек / Н. П. Абовский, Н. П. Андреев, А. П. Деруга. // – М.: Наука. – 1978. – 288 с.
9. **Аврамчук Е. Ф.** Техногия системного моделирования / Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов и др. // . – М.: Машиностроение. – Берлин: Техник. – 1988. – 240 с.
10. Акустико-эмиссионная диагностика мостовых и строительных конструкций / А.И.Манохин, А.Б.Лифшиц, Л.И.Маслов и др. // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Тр. Всесоюз. конф. Ростов н/Д., 1989. – ч.1. – С.8–13; С.63–68.
11. **Андрейкив А. Е.** Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. / Андрейкив А. Е., Лысак Н.В. // –М., 1987.–С. 121–136.
12. **Андрейкив А. Е.** Определение параметров трещиностойкости материалов с помощью характеристик акустических сигналов / Андрейкив А. Е., Лысак Н.В. // Докл. АН УССР. Сер. А.–1983.–№7.–С.26–28.
13. **Андрейків О. Є.** Метод визначення коефіцієнта інтенсивності напружень для залізобетонних елементів з тріщинами при згині / Андрейків О. Є., Лучко Й.Й., Гембара Т.В.// Фіз.-хім. механіка матеріалів. –1992. –№3. – С.98–104.
14. **Аронов Р. И.** Испытание сооружений: Учеб. пос. для вузов. / Р. И. Аронов // Высш. шк., М.:1974. 187 с.
15. **Аугусти Г.** Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати // Пер. с англ. Ю.Д.Сухова. –М.: Стройиздат, 1988. –584с.
16. **Байцар Р. І.** Нові типи багатофункціональних сенсорів / Байцар Р.І., Варшава С.О., Гінгін М.П. і інші // Методи та приклади контролю якості. –2000 – №11
17. **Байцар Р. И.** Низкотемпературная пластичность нитевидных кристаллов Si – Ge / Р. И. Байцар, С. С. Варшава, И. В. Курило // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – № 2. – С. 26–32.

18. **Байцар Р. И.** Миниатюрные полупроводниковые преобразователи для измерения импульсных давлений / Р. И. Байцар, С. С. Варшава, В. Ф. Чекурин // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 1998.–№ 3–4. – С. 46–50.
19. **Байцар Р. И.** Принципы построения многофункциональных сенсоров / Р.И. Байцар, С. С. Варшава, Е. Ф. Венгер и др.// *Наука и предпринимательство. Материалы междунар. симп.* – Винница-Львов, 1997 – С. 104.
20. **Байцар Р. И.** Особенности построения полупроводниковых вибрационно–частотных сенсоров / Р. И. Байцар, В. С. Рак // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 1998. – №1. – С. 29–31.
21. **Балабина Г. В.** Контроль качества сварных швов из пластмасс в строительстве. / Г. В. Балабина, Н. Ф. Истратов // – М.: Стройиздат, 1975. – 192 с.
22. **Бамбура А. Н.** Исследование образования и раскрытия трещин в изгибаемых элементах из базальтобетона / А. Н. Бамбура, И. И. Лучко, В. П. Рожков // *Тезисы докладов 1 Всесоюз. Симпозиума «Механика и физика разрушения композитных материалов».*–Ужгород, 1988. – С. 87.
23. **Барашиков А. Я.** Оцінювання технічного стану будівель та іженерних споруд: навчальний посібник/ А. Я. Барашиков, О. М. Малишев. – К.: Основа. – 2008. – 320 с.
24. **Барашиков А.Я.** Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений, Оглядохоронпраці України, / А. Я. Барашиков, А. М. Малишев // . – 1998. – 232 с.
25. **Бетоны.** Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при кратковременном статическом нагружении. – *Методика. ГСССД.* – М., 1988.–26 с.
26. **Бобринский А. П.** Вариант метода разности электрических потенциалов для измерения длины трещины *Физика и механика деформации и разрушения.* / А. П. Бобринский, А. Г. Краев, В. М. Маркочев // – М.:Атомиздат, 1978. –С. 3–7.
27. **Большакова И. А.** Датчик для одновременного измерения магнитного поля и температуры / И. А. Большакова, С. С. Варшава, Т. А. Московец, В. Ф. Чекурин // *Приборы и системы управления.* – 1980. – № 2. – С. 212–214.
28. **Браун У. Ф.** Испытания высокопрочных материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. / У. Ф. Браун, Д. Е. Сроули // М.. Мир, 1972. – 246 с.
29. **Варшава С. С.** Малоінерційні напівпровідникові давачі вологості / С. С. Варшава, Л. М. Пелех, П. С. Шкумбатюк // *Вісник ДУ Львівська політехніка”: Елементи теорії та прилади твердотілої електроніки.* № 362. – 1999. – С. 20–22.
30. **Васильченко Р. С.** Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкции. / Р. С. Васильченко, П. Р. Кошелев // – М.: Наука, 1974. – 147 с.
31. **Вест Ч.** Голографическая интерферометрия. / Ч. Вест // . – М.: Мир. – 1988. – 504 с.
32. **Виркус Х. М.** К методике определения характеристик трещиностойкости КІС для бетона / Х. М. Виркус, Э. Х. Варес // *Исследование по строительству. Напряжения в бетоне. Испытания конструкций.* Таллин, 1985.– С. 141–151.

33. **Воробьев В. А.** Радиационная дефектоскопия бетонных и железобетонных конструкций. / В. А. Воробьев // – М.: Стройиздат, 1972. –145 с.
34. **Галицын А. С.** Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности / А. С. Галицын, А. Н. Жуковский. // – М. : Стройиздат. – 1972. – 145 с.
35. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов / Р. Галлагер / – М.: Мир. – 1984. – 428 с.
36. **Галушко В. Г.** Вероятностно-статистические методы на автостраде. / В. Г. Галушко // . – К.: Вищ. шк., 1976. – 232 с.
37. **Гловински Р.** Численное исследование вариационных неравенств / Р. Гловински, Ж. Л. Лионс, Р. Тремольер // . – М.: Мир, 1979. – 574 с.
38. **Гнеденко Б. В.** Математические методы в теории надежности. /Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев//. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
39. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
40. ГОСТ 16483.10–73\*. Деревина. Добір зразків і методи випробувань.
41. ГОСТ 16483.3–84. Деревина. Методи визначення міцності при статичному згині.
42. ГОСТ 21243-75. Определение прочности методом отрыва со скалыванием. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
43. ГОСТ 22904 – 78. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.– Введ.1.07.1978. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
44. ГОСТ 23061 – 78. Грунты. Методы радиоизотопного определения объемного веса. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
45. ГОСТ 23858– 79. Соединения сварные стыковые и тавровые арматуры железобетонных конструкций. Ультразвуковые методы контроля качества. Правила приемки, – М.: Изд-во стандартов, 1980.– 12 с.
46. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. –61 с.
47. ГОСТ 27751–88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету.
48. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении/Е.А. Гузеев, В.В. Панасюк, Й.Й. Лучко и др. // . – М.: Госстандарт, 1994.–18 с.
49. ГОСТ 8462–85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе.
50. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. М.: Изд-во стандартов, 1982,– 12 с.
51. **Гринберг В. Е.** Контроль и оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений в эксплуатационный период. / В. Е. Гринберг, В. Г. Семенов, Г. Б. Шойхет // Л.: Стройиздат, 1982. – 19 с.
52. **Гузеев Е. А.** Анализ разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования. / Е. А. Гузеев, В. И. Шевченко, Л. А. Сейланов // Бетон и железобетон.– 1985.– №10.– С. 10–11.
53. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будівель і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування / Мінрегіонбуд України. – Київ: 2011. – 97 с.

54. Деклар. Пат. №10126 . Спосіб з'єднання арматури / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, М. М. Гвоздюк, і ін. // опубл. 15.11.2005, Бюл. №11.
55. Деклар. Пат. №18465. Полімерцементний розчин для гідроізоляційної обмазувальної штукатурки / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, Б. З. Парнета, і ін. // опубл. 15.11.2006, Бюл. №11.
56. Деклар. Пат. №38294А . Ємнісний датчик інформації / Й. Й. Лучко, М. Л. Шекета, О. В. Суберляк, та ін.; опубл. 15.05.2001, Бюл. №4.
57. Деклар. Пат. №38295А . Ємнісний датчик тиску / Й. Й. Лучко, С. С. Варшава, О. С. Заїкіна, і ін.; опубл. 15.05.2001, Бюл. №4.
58. Деклар. Пат. №63168А . Спосіб з'єднання арматурних стержнів періодичного профілю та пристрій для його реалізації / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, і ін. // опубл. 15.01.2004, Бюл. №1.
59. **Дем'ян М. Л.** Математична модель пружного елемента багатофункціонального сенсора для моніторингу трубопроводу / М. Л. Дем'ян, Й. Й. Лучко, В. Ф. Чекурін // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменяр, 2002. – Вип.4. – С. 44 – 53.
60. **Дем'ян М. Л.** Багатофункціональні датчики (огляд) / М. Л. Дем'ян // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій". Львів: Каменяр, 2000. – С. 303–322.
61. **Дем'ян М. Л.** Нові типи тензорезистивних давачів із напівпровідникових ниткоподібних кристалів. / М. Л. Дем'ян, Й. Й. Лучко, С. С. Варшава // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2000. – №6. – С. 97–100.
62. **Джонс Р.** Неразрушающие методы испытания бетонов. / Р. Джонс, И. Фэкзоару // – М.: Стройиздат, 1974. – 295с.
63. **Долидзе Д. Е.** Испытания конструкций и сооружений. / Д.Е. Долидзе // – М.: Высш, шк., 1975.–252с.
64. **Дорофеев А. Л.** Неразрушающие испытания методом вихревых токов. / А. Л. Дорофеев // –М.: Оборонгиз, 1961.–156 с.
65. ДСТУ Б. В. 2.6–27:2005. Автоматизовані системи технічного діагностування будівельних конструкцій. Види випробувань.
66. ДСТУ Б. В. 2.6–7–95. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантажуванням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості.
67. ДСТУ Б. В. 2.7–214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
68. ДСТУ Б. В. 2.7–217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона.
69. **Дьяконов В.** MathCAD 2000 /В. Дьяконов//: учебный курс. – СПб. Питер, 2000. – 592 с.
70. Експлуатація і реконструкція мостів/ Н.Є.Страхова та ін. / – К.: Транспортна академія України, 2000. –384 с.
71. Експлуатація та реконструкція мостів: Навч. посіб. / Н.Є.Страхова. – К.: НМК ВО, 1992. – 88 с.
72. **Зайцев Ю. В.** Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. / Ю. В. Зайцев // – М.: Стройиздат. – 1982. – 196 с.
73. Застосування ниткоподібних кристалів кремнію і германію в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин / І. Й. Мар'ямова, О. М. Левитська, І. Д. Гортинська та ін. // Вісн. ДУ «Львівська політехніка» №

297. Элементы теории та прилади твердотілої електроніки. – 1995. – С. 109–113.
74. **Зелинский А. Н.** Основы математического моделирования /А. Н. Зелинский. – К.: УМК ВО, 1985. – 236 с.
75. **Злочевский А. Б.** Методы регистрации и обработки результатов динамических испытаний конструкций. / А. Б. Злочевский. // – М. : МИСИ, 1977. – 84 с.
76. **Золотухин Ю. Д.** Испытание строительных конструкций. / Ю. Д. Золотухин // – Минск : Вышэйш. шк., 1983. – 207 с.
77. **Иваницкий Я. Л.** Методика определения трещиностойкости при сложном напряженном состоянии / Я. Л. Иваницкий, И. И. Лучко // Бетон и железобетон.– М., 1986. – № 10. – С.24–25.
78. **Иванов В. И.** Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений./ В. И. Иванов, В. М. Белов //– М.: Машиностроение, 1981. – 184с.
79. **Ионеску К.** Статистические методы исследования корреляций в экономике. / К. Ионеску и др. // – М.: Статистика, 1972. – С.
80. Испытание и оценка несущих свойств предварительно напряженных железобетонных конструкций / А.А.Тамарин // . – М.. Стройиздат, 1967. – 208 с.
81. Испытание сборных железобетонных конструкции / А. Г Комар, I. Н. Дубровин, Б. С.Кержнеренко, и др. // – М.: Высш школа. – 1980. – 269 с.
82. Інструкція по організації догляду за штучними спорудами. ІН.В.3.2.-218-003449261.036-96. УД ВТП “Укрдортехнологія”. – Київ. – 1996. – 90 с.
83. **Казарян А. А.** Тонкопленочный емкостной датчик давления с твердым диэлектриком. / А. А. Казарян // Приборы и системы управления, 1992. – №2. – С.24–25.
84. **Касаткин Б. С.** Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. / Б. С. Касаткин и др. // Справ, пос. – К.: Наук, думка, 1981. – 583 с.
85. **Кліменко В. З.** Випробування та обстеження будівельних кон-струкцій і споруд / В. З. Кліменко, I. Д. Белов // – К.: Основа, 2005.– 207 с.
86. **Коваленко И. Н.** Теория вероятностей и математическая статистика. / И. Н. Коваленко, А. А. Филиппова // – М.: Высш, шк., 1973. – 368 с.
87. **Коваль П. М.** Проблеми діагностики та регенерації автомо-більних мостів України / П. М. Коваль, Й. Й. Лучко // Зб. наук.праць «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій із застосуванням сучасних технологій та матеріалів». – Львів : Каменяр, 1999. – Вип.1. – С. 48–58.
88. **Коваль П. М.** Діагностика стану бетонних та залізобетонних конструкцій за характеристиками тріщиностійкості / П.М. Коваль, П. М. Сташук // Зб. доп. Укр. міжгал. наук.-практ. семінару. – Київ, 2000. – С. 106–110.
89. **Ковальчук В. В.** Багатофункціональні тензорезистори (давачі) / В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 39. – С. 72 – 82.
90. **Ковчик С. Е.** Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их опеределения / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов // Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пос. К.: Наук думка 1988 – Т. 3. – 436 с.
91. **Кокс Д.** Теоретическая статистика. / Д. Кокс, Д.Хинкли //– М.: Мир, 1978 – 416 с
92. **Комар А. Г.** Испытание сборных железобетонных конструкций /А. Г. Комар, Е. Н. Дубровин, Б. С. Кержнеренко и др. // – М. : Высш. шк, 1980. – 269 с.

93. Лантух Лященко А. И. ЛИРА. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций / А. И. Лантух-Лященко :Учебн. пособие. – М. : Стройиздат, 2001. – 312 с.
94. Лещинский М. Ю. Испытания бетона. / М. Ю. Лещинский //– М.: Стройиздат, 1980. – 360 с.
95. Лифанов И. С. Метрология, средства и методы контроля качества в строительстве. / И. С. Лифанов, Н. Г. Шерстюков // – М.: Стройиздат. – 1979.– 241 с.
96. Лівінський О. М. Довідник будівельника. Стандартизовані будівельні терміни. Діючі нормативні документи в будівництві /О. М. Лівінський, С. А. Ушацький, П. А. Оробченко // –К.: «МПЛеся», 2009. – 496 с.
97. Лужин О. В. Неразрушающие методы испытания бетона / О. В. Лужин, В. А. Волохов, Г. Б. Шамаков и др. // Под ред. О. В. Лужина. – М.: Стройиздат, 1985.–236 с.
98. Лужин О.В. Обследование и испытание сооружений. / О. В. Лужин, А. Б. Золочевский, И. А. Горбунов, и др.// – М.: Стройиздат, 1987.– 262с.
99. Лучко И. И. Предельная растяжимость мелкозернистых бетонов / И. И. Лучко // Строительные материалы и конструкции. –Киев, 1984. – № 4. – С. 35.
100. Лучко И. И. Деформация усадки в железобетонных изгибаемых элементах из мелкозернистых бетонов с трещинами в растянутой зоне / И. И. Лучко // Сб. научных трудов «Сельское строительство в условиях аграрно-промышленного комплекса Западного региона УССР» Львовский сельхозинститут.– 1985. – С.31 – 35.
101. Лучко И. И. Механика разрушения бетона (обзор) / И. И. Лучко // ФХММ. – 1991. – № 3. –С. 97 – 110.
102. Лучко Й. Й. Основні концепції механіки руйнування залізобетону / Й. Й. Лучко // Фіз-хім. механіка матеріалів.– 1995.– №4.– С.42–48.
103. Лучко Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій. / Й. Й. Лучко // .– Львів: Слово і комерція, 1997. – 435 с.
104. Лучко Й. Й. Конструкция стенда для испытаний стеновых панелей / Й. Й. Лучко // .– Строит, материалы и конструкции. – 1998. – №4. – С. 17–18.
105. Лучко Й. Й. Критерії лінійної та нелінійної механіки руйнування бетону / Й. Й. Лучко // Діагностика довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій Львів: Каменяр, 2005. – Вип. 7. – С. 104 – 120.
106. Лучко Й. Й. Експериментальні методики та результати досліджень роботи бетону стисненої зони / Й. Й. Лучко // Дороги і мости. – Київ: ДерждорНДІ, 2007. – Вип. 7. – С. 32–36.
107. Лучко Й. Й. Принцип роботи давачів та схеми вимірювання напружено-деформованого стану в елементах мостових конструкцій під час змінних температур / Й. Й. Лучко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 17. – С. 347 – 358.
108. Лучко Й. Й. Грунтознавство, механіка ґрунтів та основи і фундаменти: [Навчальний посібник рек. МОНМіСУ] / Й. Й. Лучко // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна; Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. – Львів: Каменяр, 2013. – 320 с.
109. Лучко Й. Й. Розподіл температури в металевих конструкціях та їх термо-напружений стан [текст]: [Монографія] За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й.



- Й. Лучко // М-во освіти і науки України; Львівський національний аграрний університет – Львів: Каменяр, 2019. – 356 с.
110. **Лучко И. И.** Автоматизированный стенд для испытания железобетонных конструкций / И. И. Лучко, И. Т. Артим, А. И. Гавриляк, и др. // Строительные материалы и конструкции.– Киев: Будівельник, 1989. – № 2. – С. 28 – 29.
111. **Лучко Й. Й.** Стенд для испытаний изгибаемых железобетонных конструкций / Й. Й. Лучко, И. П. Белый // . – Строит, материалы и конструкции. – 1988. ~ №4. – С. 31–32.
112. **Лучко И. И.** Определение напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при длительном действии нагрузки / И. И. Лучко, В. Я. Бачинский // Известия высших учебных заведений «Строительство и архитектура».– Новосибирск, 1983. – №11. – С.8 – 12.
113. **Лучко Й. Й.** Розкриття тріщин у залізобетонних балках / Й. Й. Лучко, Й. З. Бенке // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр, 2000. – Вип. № 4. – С. 378 – 383.
114. **Лучко Й. Й.** Деякі фізико-механічні характеристики бетонів з добавкою цеолітового порошку / Й. Й. Лучко, М. Л. Дем'ян // Вісник ЛДАУ Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Львів: ЛДАУ, 2001. – Вип. 2. – С. 91 – 94.
115. **Лучко И. И.** Исследование физико-механических свойств базальтобетона и перспектива его применения в строительных конструкциях Западного региона / И. И. Лучко, Т. В. Гембара // Композиционные материалы. Сб. науч. трудов ИПМ ПН УССР.– 1989. – С. 105 – 113.
116. **Лучко Й. Й.** Методичні рекомендації розрахунку тріщиностійкості залізобетонних балкових елементів конструкцій. / Й. Й. Лучко, Г. В. Гембара //.– Львів, ФМІ НАН України, 1995. – 49 с.
117. **Лучко Й. Й.** Застосування механіки руйнування до бетону та визначення розкриття тріщин із врахуванням стохастичного розподілу мікротріщин в зоні перед руйнування / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Матеріали 2-го міжнародного симпозіуму «Механіка і фізика руйнування матеріалів». – Львів, 1996. – С.76 – 80.
118. **Лучко Й. Й.** Методи визначення навантаження тріщиноутворення для оцінки корозійної тривкості залізобетонних конструкцій / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // Діагностика довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів: Каменяр, 2004. – Вип. 6. – С. 59 – 64.
119. **Лучко Й. Й.** Математичне моделювання стримуючого впливу арматурних стержнів на розвиток тріщин у в'язко-пружних композитах / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара, Р. І. Марусін // Тези доповідей Міжнародного симпозіуму. «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики». – Харків, 1993. – С. 47
120. **Лучко Й. Й.** Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Назаревич // . – Львів: Каменяр, 1999. –229 с.
121. **Лучко И. И.** Устройство для измерения трещин в железобетонных конструкциях / И. И. Лучко, О. М. Голяян, Т. В. Гембара // Строительные материалы и конструкции. – Киев: Будівельник, 1992. – № 3-4. – С.33 – 34.
122. **Лучко Й. Й.** Нові типи тензорезистивних датчиків із напівпро-відникових ниткоподібних кристалів / Й. Й. Лучко, М. Л. Дем'ян, С. С. Варшава // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів, 2000. – № 6. – С. 97 – 100.

123. **Лучко Й. Й.** Методика визначення розкриття тріщини в залізобетонній армованій балці таврового профілю / Й. Й. Лучко, Є. Г. Іваник // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип..29. – Дніпропетровськ.: Вид-во Дніпропетр. Нац. ун-ту залізн. трансп. ім.. акад. В.Лазаряна, 2009. – С.102 – 106.
124. **Лучко Й. Й.** Системний аналіз при обробці експериментальних даних випробувань машинобудівних та будівельних матеріалів і конструкцій: [Навчальний посібник рек. МОНУ]. За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, Є. Г. Іваник // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 265 с.
125. **Лучко Й. Й.** Методи прикладної математики в інженерній практиці: [Навчальний посібник рек. МОНУ]. За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, Є. Г. Іваник // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна; Львівський національний аграрний університет. Львів: Каменяр, 2011. – 430 с.
126. **Лучко И. И.** Определение ширины раскрытия нормальных трещин в железобетонных изгибаемых элементах при высоком уровне нагружения / И. И. Лучко, В. В. Капелюжний // Вестник Львовского политехнического института «Резервы прогресса в архитектуре и строительстве».– Львов, 1983. – № 173. – С. 68 – 70.
127. **Лучко Й. Й.** Основи досліджень та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій: [Навчальний посібник рек. МОНУ]. За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Львівський національний аграрний університет; Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури. – Львів. Каменяр, 2011. – 230 с.
128. **Лучко Й. Й.** Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів та конструкцій: [Монографія] /Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. Л. Дем'ян; НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 2001. – 436 с.
129. **Лучко И. И.** Обратное нормальное распределение и апостериорное распределения его параметров / И. И. Лучко, В. С. Куйбида // Физико-хим. мех. материалов. – Киев: Наукова думка, 1985. – № 6. – С. 102 – 104.
130. **Лучко Й. Й.** Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування: [Монографія] / Й. Й. Лучко, В. М. Чубріков, В. Ф. Лазар // НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. – Львів: Каменяр, 1999. –348 с.
131. **Лучко Й. Й.** Експериментальний метод визначення довжини зони непружних деформацій / Й. Й. Лучко, В. Ф. Лазар // 36. наук, праць. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2000. – Вип. 1. – С. 153–158.
132. **Лучко Й. Й.** Довговічність бетону залізобетонних конструкцій і споруд. / Й. Й. Лучко, В. Ф. Лазар, В. М. Чубріков // 36. наук. праць учасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення?. – К.: УГУ., 2000 – Вип. 59. – С. 156–160.
133. **Лучко Й. Й.** Довговічність бетону залізобетонних споруд / Й. Й. Лучко, В. Ф. Лазар, М. В. Чубріков // Наукові праці українського міжгалузевого семінару. «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення». – Київ, 2000. – С. 155 – 159.
134. **Лучко Й. Й.** Результати експериментальних досліджень заволоженості зразків цегляної стіни / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич // Вісник ОДАБА. –

- Одеса: Зовнішрекламсервіс, – 2007. – Вип. 26. – С. 201–210.
135. **Лучко Й. Й.** Дослідження цегляних промислових споруд тривалої експлуатації / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич // Вісник ЛДАУ. Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Львів: ЛНАУ, 2008, – Вип. 9. – С. 147 – 158.
136. **Лучко Й. Й.** Конструкції будівель і споруд: [Підручник] За ред. д.т.н., проф. Й. Й. Лучка / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, В. В. Ковальчук // М-во освіти і науки України; Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя. – Львів: Каменяр, 2018. – 745 с.
137. **Лучко Й. Й.** Обстеження фундаментів АВО газу на компресорній станції "Опори П" та їх посилення / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета // Дороги і мости. – Київ: Держдор НДІ, 2007. – Вип. 7. – С. 47 – 56.
138. **Лучко Й. Й.** Обстеження фундаментів під розвантажуючи ми опорами ГПА насосної станції „Опори” та їх посилення / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди. – Рівне, НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 377 – 387.
139. **Лучко Й. Й.** Експериментальні дослідження вологості та засоленості бетону і цегляної кладки / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, Б. Л. Назаревич, і ін. // 36.наук.пр. ОДАБА. – 2005. – С. 185 – 195.
140. **Лучко Й. Й.** Методика визначення характеристик циклічної тріщиностійкості сталей пульпопроводів / Й. Й. Лучко, І. М. Панько // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2004. – Вип. 11. – С. 208 – 214.
141. **Лучко Й. Й.** Методика та програма експериментальних досліджень залізобетонних балок, армованих з'єднаною арматурою на малоциклову втому / Й. Й. Лучко, А. Я. Пенцак, О. М. Гайда // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2010. – Вип. 38. – С. 414 – 425.
142. **Лучко И. И.** Расстояние между трещинами в базальтобетонных изгибаемых элементах / И. И. Лучко, К. М. Русинко, В. В. Лотыш // Институт проблем материаловедения АН Украины. [Препринт]. – 1991. – № 6. – С. 6 – 11.
143. **Лучко И. И.** Установка для подбора оптимальных режимов тепловой обработки изделий / И. И. Лучко, В. Ф. Сафаров, И. П. Белый, и др. // Строительные материалы и конструкции. – Киев: Будівельник, 1990. – № 1. – С.25 – 26.
144. **Лучко Й.Й.** Стенди руйнівного і неруйнівного контролю якості залізобетонних виробів / Й.Й. Лучко, В.О. Сафаров // ФМІ НАН України. – Львів, 1994. – № 191. – 46 с.
145. **Лучко Й. Й.** Дослідження розвитку тріщин у залізобетонних балкових елементах методами механіки руйнування / Й. Й. Лучко, О. Д. Савчик, Т. В. Гембара // Вісник державного університету «Львівська політехніка» Теорія і практика будівництва. – Львів, 1996. – № 300. – С.93 – 96.
146. **Лучко Й. Й.** Закриття тріщин в залізобетонних конструкціях ін'єкційними методами / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, О. М. Гайда // Мости і тунелі. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 4. – С. 19 – 25.
147. **Лучко Й. Й.** Фундаменти та опори мостів: [Навчальний посібник] / Й. Й. Лучко, М. Р. Хархаліс // М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Ужгород. нац. ун-т. – Львів: Каменяр, 2004. – 235 с. ISBN 5-7745-1047-6.
148. **Лысак Н. В.** Исследование субкритического роста трещин с помощью акустической эмиссии / Н. В. Лысак, В. Р. Скальский // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – №4. – С. 113–114.

149. **Лысак Н. В.** Акустическая эмиссия и разрушение бетона при статистическом нагружении / Н. В. Лысак, В. Р. Скальский, И. И. Лучко // Известия высших учебных заведений «Строительство и архитектура». – Новосибирск, 1990. – № 12. – С.48 – 52.
150. М.Р.В. 2.3 – 218 – 03450778 – 6843:2007. Методичні рекомендації з вимірювання характеристик напружено-деформованого стану елементів моста при змінних температурах / Й. Й. Лучко (кер.), Н. О. Гембара, В. В. Дяків, і ін. // Київ: ДерждорНДЦ, – 2007. – 18 с.
151. **Макаренко М. М.** К вопросу проектирования продольного уклона дорог с учетом движения автопоездов / М. М. Макаренко // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – К.: Будівельник, 1969. – Вып. 5.
152. **Максимов Л. С.** Измерение вибраций сооружений. / Л. С. Максимов, И. С. Шейнин // – М.: Л.: Стройиздат, 1974.– 252 с.
153. **Малькова Р. И.** Методика испытания напряжений поляризационно-оптическим методом. / Р. И. Малькова // – М.: Наука, 1970. – 115 с.
154. **Маркочев В. М.** Новый метод измерения длины трещины в токопроводящих образцах / В. М. Маркочев, А. П. Бобринский, В. М. Кийко // Зав. лаб.~ 1974.–№9.–С. 862–862.
155. **Маркочев В. М.** Методика оценки скорости развития трещин и получения заданого напряжения при повторном нагружении / В. М. Маркочев, Б.А. Дроздовский // Там же. – 1965.–№2.–С.345–349.
156. **Мартин Ф.** Моделирование на вычислительных машинах. / Ф.Мартин // – М.: Сов. радио, 1972. – 288 с.
157. Машины и приборы для измерения механических величин: Справ. ЦНИИТЭП приборостроения. – М., 1973. – 252 с.
158. Методика статистической обработки эмпирических данных. – М.: Изд. стандартов, 1966.
159. Методические рекомендации определения нормативных и расчетных характеристик мелкозернистых бетонов / Л. А. Морин, Й. Й. Лучко, М. М. Федоренко, В. А. Шталтовный // Научно-исследовательский институт строительных конструкций Госстроя СССР, Киев, 1981. – 18 с.
160. Методические рекомендации по испытанию армоцемента. – К.: НИИСК Госстроя СССР, 1976.–68с.
161. Методические рекомендации по технологии изготовления конструкций из базальтобетона, базальтозолешлакобетона и золешлакобетона /И. И. Лучко, А. А. Скибинская и др. – Львов: ФМИ АН УССР. – 1988. – 25 с.
162. Методические рекомендации по экспериментальному определению деформации усадки и ползучести бетонов. – К.: НИИСК Госстроя СССР, – 1976. – 30с.
163. Методические рекомендации. Расчет и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик сопротивления распространению трещин продольного сдвига / Д. Е. Андрейкив, Е. Л. Иваницкий, В. А. Зазуляк и др. Львов: Физ-мех. институт им. Г.В. Карпеко НАН Украины, – 1987.–22с.
164. Методичні рекомендації з проектування та технології виготовлення залізобетонних конструкцій, армованих стержнями, що з'єднані обтиснутими втулками / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара, Я. Л. Іваницький, і ін. // ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. Львів, – 2004. – 26 с.
165. Методичні рекомендації з розрахунку тріщиностійкості залізобетонних

- балкових елементів конструкцій / Й. Й. Лучко, Т. В. Гембара // ФМІ НАН України. – Львів. – 1995. – 49 с.
166. Методичні рекомендації по визначенню характеристик тріщиностійкості бетонів під статичним навантаженням / Й. Й. Лучко, О. Є. Андрейків, В. В. Панасюк, і ін. // – Львів, ФМІНАН України, 1997. – 36 с.
167. Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пос.: в 4-х т./Под общ. ред. В.В.Панасюка, – К.: Наук, думка, 1988. – С. 368–407.
168. МИ-11-74. Методика по определению прочностных и деформационных характеристик бетонов при одноосном кратковременном статическом сжатии. – М.:Изд-во стандартов, 1975.–80с.
169. Миниатурные тензорезисторы типа «Кремнистор» с базой 1-2 мм / А. В. Сандулова, И. И. Марьямова, Ю. И. Загапяч и др. // Тез. докл. IV конф, по полупроводниковой тензометрии. – Львов, 1969.–С. 15.
170. **Митропольский А. К.** Техника статистических вычислений. / А. К. Митропольский // – М.: Наука, 1971. – 576 с.
171. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. СниПЗ.26.07-86. - М.: Госстрой, 1987. – 40 с.
172. МРВ. 2.3-37641918-888:2017 Методичні рекомендації з відновлення залізобетонних конструкцій і труб методом ін'єкційного просочування полімерними розчинами / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, О. М.Гайда // – Київ, ДерждорНДІ, 2017. – 32 с.
173. МРВ. 2.3 – 218 – 03534508 – 510:2006. Методичні рекомендації з'єднання арматурних стержнів обтискними втулками. / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, І. А. Вергун та ін. // Львів: ФМІ НАНУ. – 2006. – 16 с.
174. **Новгородский М. А.** Испытание материалов, изделий и конструкций. / Новгородский М. А.// – М.: Высш, шк.,1971.
175. **Новиков О. А.** Вероятностные методы решения задач автомобильного транспорта. / О. А. Новиков, В. Н. Уваров // – М.: Транспорт. – 1969. – 136 с.
176. **Носилевский Л.Н.** Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. / Л. Н. Носилевский. // – М.: Науч.–изд. центр «Инженер».– 1999. – 295 с.
177. Оборудование лабораторий строительно-монтажных организаций и предприятий стройиндустрии: Справ, строителя. М. : Строиниздат, – 1984.– 109 с.
178. Обследование и испытание сооружений/ Под ред. О.В. Лужина.– М.: Стройиздат, 1987.– 263 с.
179. **Омельчук С. К.** Стереофотограмметричні обстеження транспортних споруд / С. К. Омельчук, П. П. Дзюба // 36. доп. Укр. міжгал. наук, практ. семінару. Київ: 2000. – С. 173–174.
180. **Пак А. П.** Исследование трещиностойкости бетона с позиции механики разрушения / А. П. Пак // Бетон и железобетон. –1985. –№8. – С. –41–42.
181. **Пак В.** Практическое применение контактных тепловых методов неразрушающего контроля. / В. Пак, Б. И. Воронцов // – М.. –1972.
182. **Панасюк В. В.** Оценка трещиностойкости цементного бетона по вязкости разрушения / В. В. Панасюк, Л. Т. Бережницкий, В. М. Чубриков // Бетон и железобетон. – 1981. – №2. – С. 19–20.
183. **Панасюк В. В.** Акустическая эмиссия при разрушении материалов / В. В. Панасюк, О. Н. Сергиенко, С. И. Микитишин // Физ.-хим. механика материалов –1983. – №6. – С.50–53.

184. **Партон В.З.** Механика упругопластического разрушения. / В.З. Партон, Е. М. Морозов // – М.: Наука, 1985. – 504 с.
185. Пат. № Україна: МПК Пристрій діагностики технічного стану металевих гофрованих конструкцій. / В. В. Ковальчук, Й. Й. Лучко, О. М. Возняк // опубл. 10.05.2018, Бюл. №9. – 7с.
186. Пат. №39424 Україна. Ін'єктор / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич, Б. З. Парнета, і ін. // опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.
187. Пат. №87550 Україна: МПК G01B 5/30 (2006.01) Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованого стану мостових конструкцій при змінних температурах і навантаженнях (ВНДСМК) / Й. Й. Лучко, О. М. Возняк, В. В. Ковальчук // опубл. 10.02.2014, Бюл. №3.
188. Пат. №94540 Україна: МПК G01B 5/30 (2006.01) Спосіб визначення напружень у мостових конструкціях та металевих гофрованих трубах, які виникають внаслідок дії змінних температур та навантажень / Й. Й. Лучко, О. М. Возняк, В. В. Ковальчук // опубл. 25.11.2014, Бюл. №22.
189. **Перельмутер А.В.** Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. / А. В. Перельмутер // – К.: Укрнипроектстальконструкция. – 1999. – 212 с.
190. **Покрасс В.Л.** Определение законов распределения случайных величин. / В. Л. Покрасс и др. // – М.: Гипротис, 1969.
191. **Поляк Ю. Г.** Вероятностное моделирование на ЭВМ. / Ю. Г. Поляк // – М.: Сов.радио, 1971.
192. Полупроводниковые тензодатчики / Под ред. М. Дина. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 126 с.
193. **Поляков Л. П.** Моделирование строительных конструкций / Л. П. Поляков, В. М. Файнбурд // – К.: Будівельник, 1975. – 160с.
194. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. У.П.Осадчего.–М.: Машиностроение, 1979.–480с.
195. **Радыш К. В.** Диагностика состояния и прогнозирование работоспособности мостов / К. В. Радыш, А. С. Киреев, Ю.В. Радыш // Зб. доп. Укр. міжгал наук. практ. семінару. – Київ, 1998. – С. 162–172.
196. **Рапопорт Ю. М.** Ультразвуковая дефектоскопия строительных деталей и конструкций. / Ю. М. Рапопорт // – Л.: Стройиздат, 1975. – 128 с.
197. РД 50-260-81. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. - М.: Изд-во стандартов, 1982.– 56с.
198. РД 50-398-83. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний. Планирование механических испытаний и статическая обработка результатов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 200 с.
199. **Рейниш В. П.** Испытания конструкций, применяемых в энергетическом строительстве. / В. П. Рейниш, Б. Г. Фиш. // – М., 1972.
200. Рекомендації з визначення температури в оболонках та пластинах з багатошаровими покриттями / Розроб. Й. Й. Лучко, Н. О. Гембара // М-во освіти і науки України. Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Львів. філія.; Укр. академія друкарства. – Львів: Каменяр, 2014. – 30 с.

201. Рекомендації з визначення термонапруженого стану мостових конструкцій / Розроб. Й. Й. Лучко, В. В. Ковальчук; за ред. д.т.н., проф.. Й. Й. Лучка // М-во освіти і науки України. Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Львів.філія. – Львів: Каменяр. – 2013. – 34 с.
202. Рекомендації з вимірювання характеристик напружено–деформативного стану конструкцій мостів під час змінних температур і навантажень / Й. Й. Лучко, В. Ф. Чекурін, В. В. Дяків і ін. // Львів: ДерждорНДІ ім. М. П. Шульгіна – ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, 2008. – 34 с.
203. Рекомендації з влаштування гідроізоляції бетонних та залізобетонних конструкцій / Й. Й. Лучко, Б. З. Парнета, О. М. Гайда // Львів: Каменяр. – 2009. – 36 с.
204. Рекомендації з влаштування горизонтальної гідроізоляції у будівлях старої забудови / Й. Й. Лучко, Б. Л. Назаревич // Львів: Каменяр, – 2009. – 67 с.
205. Рекомендації з проектування армування залізобетонних елементів мостів арматурними стержнями, що з'єднані обтискними втулками / Й. Й. Лучко, А. Я. Пенцак, Р. Я. Пелех, і ін. // Львів: Каменяр, – 2009. – 47 с.
206. Рекомендації з розрахунку характеристик напружено-деформованого стану конструкцій мостів / Й. Й. Лучко, М. І. Ігнатишин // Львів: Каменяр, – 2010. – 24 с.
207. **Ренский А. Б.** Испытания строительных конструкций с применением электро-тензометрического метода измерения деформаций. / А. Б. Ренский, К. И. Стрильцевский // – М.; Стройиздат, 1970. – 56 с.
208. **Сафанов В. А.** Стенды для контроля качества сборных железобетонных изделий неразрушающимся методом / В. А. Сафанов, Р. М. Пириг, А. В. Ягуцин // Строит, индустрия. – 1983. – №3. – С. 12–16.
209. **Сердюков В. М.** Испытание сооружений. / В. М. Сердюков, А. Г. Григоренко, Л. И. Кривелев // – К.: Будівельник, 1976. – 200 с.
210. СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП. 1985 – 200 с.
211. СНиП 3.06.07 86. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП 1987. – 40с.
212. **Соболь И. М.** Метод Монте-Карло. / И. М. Соболь // – М.: Наука, 1972. – 64 с.
213. Содержание и реконструкция мостов /В.О.Осипов и др./ – М.: Транспорт, 1986.–327с.
214. Содержание и ремонт мостов и труб на автомобильных дорогах / К.В.Гайдук и др. – М.: Транспорт, 1976. – 296 с.
215. СОУ 45.2 – 00018112 – 016:2007. Стандарт організації України (СОУ). З'єднання арматурних стержнів обтискними втулками / Й. Й. Лучко, А. Я. Пенцак, О. О. Стабровський, і ін. // Львів: ЛРНТУ ДерждорНДІ, 2007. – 16 с.
216. **Степанов Н. Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. / Н. Н. Степанов // – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
217. **Тетиор А. Н.** Обследование и испытание сооружений. / А. Н. Тетиор, В. Н. Помаранец // –К.: Вищ. шк., 1988.–207с.
218. Технологія створення і дослідження властивостей контактів на напівпровідникових тензодатчиках типу «Кремністор» / А.В. Сандулова, І. І. Марьямова, Ю. І.Загап'яч і др. // Полупроводниковая тензометрия. – Новосибирск: НЭТИ, 1969. – Ч. 1. – 14 с.
219. **Тимошенко С. П.** История науки о сопротивлении материалов. / С. П. Тимошенко // – М.: Госстройиздат, 1957. – 536 с.

220. **Трапезников Л. П.** Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. / Л. П. Трапезников // – М.: Энергоатомиздат, – 1986.– 272 с.
221. ТУ У В.26.6 – 00018112 – 157:2006. З'єднання стержнів арматури обтискними втулками / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, І. А. Вергун, і ін. // ФМІ НАН України, 2006. – 17 с.
222. **Уемов А. И.** Логические основы метода моделирования. / А. И. Уемов // – М.: Мысль, 1971. – 311 с.
223. Установка для подбора оптимальных режимов тепловой обработки изделий / Й.Й.Лучко, В.А.Сафанов, И.П.Белый, і ін.// Строит, материалы и конструкции. – 1990. – №1. – С. 25–26.
224. **Финкель В. М.** Физические основы торможения трещин. / В. М. Финкель //–М.: Металлургиздат, 1977. – 360 с.
225. **Фомица Л.Н.** Измерение напряжений в железобетонных конструкциях. / Л. Н. Фомица, Р. А. Сумбатов //– К.: Будівельник, 1994. – 167 с.
226. **Хан Г.Г.** Статистические модели в инженерных задачах. / Г. Г. Хан, С. С. Шапиро //– М.: Мир, 1969. – 395 с.
227. **Хэммонд Р.** Аварии зданий и сооружений (пер. с англ). М Госстройиздат, 1960. – 188 с.
228. **Чекурін В. Ф.** Методика прискорених статистичних випробувань скла на довготривалу міцність / В. Ф. Чекурін, Й. Й. Лучко, А. М. Марголін, і ін. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. – Львів: Каменяр, 2005. – Вип. 6. – С. 384 – 394.
229. **Чекурін В. Ф.** Передавальні характеристики пружного елемента багатofункціонального сенсора для моніторингу трубопроводу / В. Ф. Чекурін, М. Л. Дем'ян, Й. Й. Лучко // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр, 2002. – Вип. 5. – С. 400 – 405.
230. **Чижигов Д. М.** Теллур и теллуриды. / Д. М. Чижигов, В. П. Счастливый // – М Наука, 1966. – 279 с.
231. **Шавин А. Ф.** Эксплуатационная надежность оросительных систем / А. Ф. Шавин, В. Н. Померанец, В. М. Хорев // Под ред. В. Н. Померанца. К.: Будівельник, 1982. – 63 с.
232. **Шарма Б. Л.** Полупроводниковые гетеропереходы. / Б. Л. Шарма, Р. К. Пурохит // – М.: Сов. радио, 1979. – 165 с.
233. **Шейнин А.М.** К определению объема выборки и про должительности испытаний при исследовании надежности / А. М. Шейнин и др. // Вест, машиностроения – 1970. –№11.
234. **Шейнин А.М.** Методы нормирования надежности и долговечности автомобиля в эксплуатации / А. М. Шейнин // Тр. Респ. конф, по проблемам развития автотранспорта. Ереван, 1966.
235. **Шкинев А. Н.** Аварии в строительстве. / А. Н. Шкинев // –М.: Стройиздат, 1984. – 320 с.
236. **Шор Я.Б.** Таблицы для анализа и контроля надежности. / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин // – М.: Советское радио, 1968. – 284 с.
237. **Шрайбер Д. С.** Ультразвуковая дефектоскопия. / Д. С. Шрайбер // –М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
238. Кириллов В.С. Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах // – М.: Транспорт, 1971. – 194 с.



239. Ягуст В. И. О границах области применения линейной механики разрушения к бетону. Бетон и железобетон. / В. И. Ягуст // – 1982.– №6.– С.25–26.
240. 50-FMC RILEM Draft Recommendation. Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bend Test on Notched Beams// *Mateviaux et Constructions*. – 1985.– №106.– P.285–290.
241. Andrews E. IL, Levy G.M. An ultrasonic technique for measuring and erase velocities // *J.Mater. Sci.* – 1971.– N6. – P. 1094–1099.
242. Bundy F. P. Electrical behavior of Se and Te to pressures of about 500 kbar / F. P. Bundy, K. J. Dunn // *J.Chem. Phys.*–1979.–71, – №4. –P. 1550.
243. Chichikara R. S. The inverse Gaussian distribution as a lifetime model. / R. S. Chichikara, I. L. Folks // *Technometrics*. 1977, – 19, – P. 461–468.
244. Czaputowicz E. Electrooporowe mierniki wysokich cisnien / E.Czaputowicz // *Pomiary. Automatyka. Kontrola*. – 1969. –№ 11. – S. 472.
245. Panasyuk V.V. Determination of calculated parametres of concrete dispersive–reinforced by basalt fibre / V. V. Panasyuk, O. Ye. Andrejkiv, J. J. Luchko / *Proc. of 6th Intern. conf. “Modern building materials, structures and techniques”*.–Vilnius, Lithuani, 1999.–P.86–88.
246. Piezoresistance of selenium single crystals / Takagi Toru, Seki Masahiro, Ochi Osanu, Mizushima Yoshihiko//*Japan. J. Appl. Phys.* – 1969.– 8, № 11.–P. 1353.
247. Zaitsev Yu. V. Notch Sensitivity of Concrete and Size Effect. Part 2. Stress State Effect. / Yu. V. Zaitsev, K. L. Kovler // *Cement and Concrete Research* – 1986.16, – №1–P. 7–16.

## Коротко про автора



**Лучко Йосип Йосипович** – доктор технічних наук, професор, академік Академії будівництва України. Спеціаліст в галузі механіки деформованого твердого тіла та міцності будівельних матеріалів, конструкцій та споруд. Професор кафедри будівельних конструкцій Львівського національного аграрного університету.

Закінчив з відзнакою Львівський політехнічний інститут (інженерно-будівельний факультет, 1973 р.) та Львівський державний університет імені І. Франка (факультет прикладної математики, 1979 р.). За роки роботи пройшов шлях інженера, провідного наукового співробітника, доцента, професора, доктора технічних наук, академіка Академії будівництва України.

Напрямки наукових досліджень професора Й. Й. Лучка: механіка руйнування будівельних конструкцій будівель і споруд; теоретичні та експериментальні дослідження міцності, тріщиностійкості та деформативності будівельних конструкцій, будівель і споруд.

Запропонував низку оригінальних методичних розробок та підходів для оцінки тріщиностійкості будівельних матеріалів та конструкцій, в тому числі в агресивних середовищах, та визначення їх базових характеристик розрахунку міцності та довговічності будівель, мостів та споруд. Встановив критерії розвитку тріщин, розробив методику розрахунку параметрів тріщиностійкості з урахуванням зчеплення бетону з арматурою, повзучості і усадки бетону в залізобетонних конструкціях. Оптимізував методику випробування зразків з надрізами. Створив модель розрахунку деградації бетону та залізобетонних конструкцій. Розробив новий тип з'єднання арматурних стержнів. Створив низку експериментальних методик випробування елементів конструкцій та матеріалів, стенди та пристрої для вимірювання деформацій.

За результатами наукових досліджень є автором і співавтором понад 480 наукових праць та навчально-методичних розробок, у тому числі двох довідників, п'ятох навчальних посібників та п'яти підручників рекомендованих МОН України, десяти патентів і авторських свідоцтв, семи нормативних документів та одинадцяти монографій. Під його керівництвом підготовлено та захищено десять кандидатів технічних наук. Член Вчених рад по захисту кандидатських і докторських дисертацій у різні періоди в НУ "Львівська політехніка" та Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Дійсний член Академії будівництва України з 2002 року і Європейського товариства механіки руйнування матеріалів і цілісності конструкцій (ESIS) та член правління Українського товариства з механіки руйнування матеріалів.

Член багатьох редакційних рад збірників та вісників, наукових праць різних університетів.

Передмова .....	3
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ, КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД.....	16
1.1. Мета та завдання досліджень та випробовувань. ....	16
1.2. Методи обстеження та випробування будівель і споруд .....	18
1.3. Метрологічне забезпечення експериментальних досліджень та випробувань будівельних конструкцій і споруд .....	21
1.4. Загальні положення контролю якості матеріалів, конструкцій і споруд .....	27
1.5. Поняття про оцінку надійності конструкцій будівель і споруд.....	31
1.6. Історичний нарис розвитку методів досліджень та випробувань.....	32
1.7. Висновки до розділу 1 .....	42
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСОБИ ЇХ ПРОВЕДЕННЯ.....	44
2.1. Способи випробувань конструкцій .....	44
2.2. Силові дії. Створення статичних навантажень .....	44
2.3. Вимірювальні прилади для статичних випробувань .....	47
2.4. Динамічні навантаження .....	60
2.5. Вимірювальні прилади для динамічних випробувань .....	63
2.6. Висновки до розділу 2 .....	72
3. НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ ВИПРОБУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ .....	73
3.1. Фізико-механічні характеристики матеріалів та неруйнівні методи випробувань конструкцій .....	73
3.1.1. Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів .....	73
3.1.2. Неруйнівні методи випробувань конструкцій .....	75
3.2. Механічні методи визначення поверхневої твердості.....	77
3.2.1. Метод визначення твердості, оснований на відскоку.....	78
3.2.2. Метод визначення твердості, оснований на відбитку.....	79
3.2.3. Інші механічні методи визначення поверхневої твердості.....	81

3.3. Акустичні методи дослідження конструкцій .....	84
3.4. Радіаційні методи .....	93
3.4.1. Метод проникальної радіації .....	94
3.4.2. Метод швидких нейтронів.....	98
3.5. Магнітні та електромагнітні методи.....	98
3.5.1. Магнітні методи .....	98
3.5.2. Електромагнітні методи.....	102
3.6. Оптичні методи досліджень .....	104
3.7. Інші методи неруйнівного контролю .....	108
3.7.1. Метод капілярної дефектоскопії.....	108
3.7.2. Метод різниці електричних потенціалів .....	112
3.7.3. Метод вихрових струмів.....	112
3.8. Висновки до розділу 3 .....	113
<b>4. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ .....</b>	<b>115</b>
4.1. Загальні відомості .....	115
4.2. Стенд для випробування балкових залізобетонних конструкцій .....	116
4.3. Стенд для випробування стінових панелей СВСП-1 .....	118
4.4. Стенд контролю якості довгомірних залізобетонних виробів СНК-4 .....	122
4.5. Стенд контролю якості плит перекриття СНК-3.....	124
4.6. Стенд контролю якості внутрішніх стінових панелей СНК-1 .....	128
4.7. Стенд контролю якості внутрішніх стінових панелей СНК-2 .....	133
4.8. Установка для підбору оптимальних режимів теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів .....	134
4.9. Автоматизований стенд для випробування залізобе- тонних конструкцій.....	138
4.10. Нестандартне обладнання .....	140
4.11. Висновки до розділу 4 .....	144
<b>5. ДАВАЧІ ТИСКУ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В БУДІВЕЛЬНИХ     КОНСТРУКЦІЯХ ТА СПОРУДАХ .....</b>	<b>146</b>
5.1. Нові типи багатофункціональних сенсорів.....	146
5.2. Пристрої для досліджень тензорезистивних давачів вимірювання деформацій, побудованих з ниткоподіб- них кристалів .....	153

5.3. Нові типи тензорезистивних давачів з напівпровідникових ниткоподібних кристалів.....	159
5.4. Ємнісні давачі для вимірювання тиску та деформації в залізобетонних мостових конструкціях.....	164
5.5. Застосування напівпровідникових тензорезисторних давачів для дослідження фізико-механічних характеристик бетонів з добавкою цеолітового порошку .....	169
5.6. Висновки до розділу 5 .....	172
<b>6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОСТУ ТРІЩИНИ.....</b>	<b>174</b>
6.1. Загальні відомості .....	174
6.2. Метод пружної податливості .....	177
6.3. Ультразвуковий метод.....	180
6.4. Метод різниці електричних потенціалів.....	183
6.5. Метод акустичної емісії .....	188
6.6. Оптичні методи .....	190
6.7. Метод вихрових струмів .....	193
6.8. Магнітні методи .....	195
6.9. Метод сигнальних давачів .....	198
6.10. Фрактографічні методи .....	200
6.11.Спосіб вимірювання розкриття та довжини тріщин у залізобетонних конструкціях.....	204
6.12. Висновки до розділу 6 .....	206
<b>7. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ, ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА ІНШИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>208</b>
7.1. Зразки та способи їх виготовлення .....	208
7.2. Обладнання, прилади та засоби для досліджень зразків.....	216
7.3. Підготовка зразків до випробувань.....	218
7.4. Проведення випробувань .....	221
7.5. Обробка результатів випробувань і визначення міцнісних, деформаційних і структурно-механічних властивостей бетону.....	228
7.6. Визначення довговічності армоцементу.....	231
7.7. Визначення механічних характеристик сталі.....	238
7.8. Визначення механічних характеристик цегли керамічної .....	241
7.9. Визначення механічних характеристик деревини .....	243
7.10. Висновки до розділу 7. ....	247

8. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ .....	249
8.1. Мета, завдання та науковий рівень методичних рекомендацій .....	249
8.2. Загальні положення та зразки .....	254
8.3. Зразки. ....	255
8.4. Обладнання, проведення випробувань та обробка результатів .....	257
8.4.1. Обладнання та випробування.....	257
8.5. Проведення випробувань.....	258
8.6. Обробка результатів випробувань .....	259
8.7. Визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань з фіксуванням розмірів зростальної магістральної тріщини і відповідних поточних значень навантаження .....	265
8.8. Обладнання для визначення характеристик тріщиностійкості під час рівноважних випробувань зразків .....	266
8.9. Рекомендації на випробування зразків під час одночасного розтягу і закруту .....	268
8.10. Рекомендації для випробування бетону на кліматичну тріщиностійкість (морозостійкість).....	271
8.11. Визначення розрахункових параметрів руйнування бетонів, дисперсно армованих базальтовим волокном .....	275
8.12. Висновки до розділу 8 .....	284
9. ДОВГОТРИВАЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ОСНОВ І ФУНДАМЕНТІВ .....	286
9.1. Натурні обстеження і довготривалі випробування будівель і споруд. ....	286
9.2. Обстеження і випробування основ і фундаментів. ....	293
9.3. Вимірювання тисків і напружень у ґрунтах. ....	295
9.4. Вимірювання деформацій і фільтрації ґрунтів основи.....	297
9.5. Геофізичні методи контролю основ і гірських порід. ....	300
9.6. Висновки до розділу 9 .....	303
10. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ МОСТІВ.....	305
10.1. Обстеження мостів.....	305
10.2. Статичні випробування мостів.....	308
10.3. Динамічні випробування мостів. ....	316

10.4. Обробка й аналіз результатів обстеження та випробування мостів.....	320
10.5. Суть методів моделювання й галузь їх використання.....	332
10.6. Випробування мостів з руйнуванням конструкцій.....	341
10.7. Висновки до розділу 10 .....	349
11. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТІ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ.....	351
11.1. Характеристики випадкових величин.....	351
11.2. Нормальний розподіл .....	354
11.3. Логарифмічно-нормальний розподіл .....	360
11.4. Обернений нормальний розподіл і апостеріорний розподіл його параметрів .....	362
11.5. Розподіл Грама-Шарле .....	366
11.6. Розподіл Вейбулла .....	374
11.7. Розподіл Пуассона .....	378
11.8. Біноміальний розподіл.....	384
11.9. Геометричний розподіл.....	385
11.10. Висновки до розділу 11 .....	388
12. ТЕОРІЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, КОРЕЛЯЦІЙНО РЕГРЕСИВНИЙ АНАЛІЗ ТА КРИТЕРІЇ УЗГОДЖЕНОСТІ .....	390
12.1. Теорія математичного планування експерименту .....	390
12.2. Використання кореляційно-регресивного аналізу для встановлення залежностей між характеристиками міцності та деформаціями будівельних конструкцій.....	400
12.3. Критерії узгодженості .....	407
12.4. Висновки до розділу 12 .....	412
13. МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ.....	414
13.1. Суть методів моделювання й галузь їх використання.....	414
13.2. Метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло).....	418
13.3. Основні етапи побудови моделі та формування її задуму .....	420
13.4. Реалізація моделі та результати моделювання.....	422
13.5. Способи одержання на ПК псевдовипадкових чисел із заданим законом розподілу та рівномірно розподілених чисел.....	424

13.6. Одержання псевдовипадкових чисел методом Неймана та за дискретними законами.....	428
13.7. Висновки до розділу 13 .....	431
14. МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	433
14.1. Загальні положення і класифікація методів моделювання будівельних конструкцій .....	433
14.2. Основні положення фізичного моделювання будівельних конструкцій.....	435
14.3. Відомості про теорію подібності та розмірності фізичного моделювання будівельних конструкцій.....	436
14.4. Специфіка виготовлення фізичних моделей будівельних конструкцій (споруд).....	440
14.5. Модельні фізичні дослідження будівельних конструкцій та споруд.....	442
14.6. Загальні положення математичного моделювання будівельних конструкцій .....	447
14.7. Математичні моделі прямої аналогії будівельних конструкцій.....	449
14.8. Висновки до розділу 14 .....	456
Загальні висновки .....	458
Список літератури .....	467
Коротко про автора.....	482



# CONTENT

Preface .....	10
1. RESEARCH AND TESTING OF MATERIALS, STRUCTURES OF BUILDINGS AND STRUCTURES .....	16
1.1. Purpose and objectives of research and testing .....	16
1.2. Methods of inspection and testing of structures .....	18
1.3. Metrological support of experimental researches and tests of building constructions and constructions .....	21
1.4. General provisions for quality control of materials, structures and structures .....	27
1.5. The concept of assessing the reliability of structures of buildings and structures .....	31
1.6. Historical sketch of the development of research and testing methods .....	32
1.7. Conclusions to section 1 .....	42
2. RESEARCH AND MEANS OF CONDUCTING THEM .....	44
2.1. Methods of testing structures .....	44
2.2. Force actions. Creating static loads .....	44
2.3. Measuring instruments for static tests .....	47
2.4. Dynamic loads .....	60
2.5. Measuring instruments for dynamic tests .....	63
2.6. Conclusions to section 2 .....	72
3. NON-DESTRUCTIVE METHODS OF TESTING BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES .....	73
3.1. Physico-mechanical characteristics of materials and non-destructive methods of structural testing .....	73
3.1.1. Determination of physical and mechanical characteristics of materials .....	73
3.1.2. Non-destructive methods of testing structures .....	75
3.2. Mechanical methods for determining surface hardness .....	77
3.2.1. The method of determining the hardness based on the rebound .....	78
3.2.2. The method of determining the hardness based on the impression .....	79
3.2.3. Other mechanical methods for determining surface hardness .....	81
3.3. Acoustic methods of research of designs .....	84

3.4. Radiation methods.....	93
3.4.1. Method of penetrating radiation.....	94
3.4.2. Method fast neutron.....	98
3.5. Magnetic and electromagnetic methods.....	98
3.5.1. Magnetic methods.....	98
3.5.2. Electromagnetic methods.....	102
3.6. Optical research methods.....	104
3.7. Other methods of non-destructive testing.....	108
3.7.1. Capillary flaw detection method.....	108
3.7.2. Method of difference of electric potentials.....	112
3.7.3. Eddy current method.....	112
3.8. Conclusions to section 3.....	113
4. TEST EQUIPMENT.....	115
4.1. General Information.....	115
4.2. Stand for testing beam reinforced concrete structures.....	116
4.3. Stand for testing wall panels SVSP-1.....	118
4.4. Stand of quality control of long-term reinforced concrete products SNK-4.....	122
4.5. The stand of quality control of plates of overlapping of SNK-3.....	124
4.6. Stand of quality control of internal wall panels SNK-1.....	128
4.7. Stand of quality control of internal wall panels SNK-2.....	133
4.8. Installation for selection of optimal modes of heat treat- ment of concrete and reinforced concrete products.....	134
4.9. Automated stand for testing reinforced concrete structures.....	138
4.10. Non-standard equipment.....	140
4.11. Conclusions to section 4.....	144
5. PRESSURE AND DEFORMATION SENSORS IN BUILD- ING STRUCTURES AND STRUCTURES.....	146
5.1. New types of multifunction sensors.....	146
5.2. Devices for research of strain gages of strain gauges con- structed from filamentary crystals.....	153
5.3. New types of strain gage sensors made of semiconductor filamentary crystals.....	159
5.4. Capacitive sensors for measuring pressure and defor- mation in reinforced concrete bridge structures.....	164

5.5. Application of semiconductor strain gages for the study of physical and mechanical characteristics of concrete with the addition of zeolite powder.....	169
5.6. Conclusions to section 5 .....	172
6. EXPERIMENTAL METHODS OF INVESTIGATION OF CRACK GROWTH.....	174
6.1. General Information.....	174
6.2. Elastic flexibility method.....	177
6.3. Ultrasound method.....	180
6.4. Method of difference of electric potentials.....	183
6.5. Acoustic emission method.....	188
6.6. Optical methods.....	190
6.7. Eddy current method.....	193
6.8. Magnetic methods.....	195
6.9. Signal sensor method.....	198
6.10. Fractographic methods.....	200
6.11. Method of measuring crack opening and crack length in reinforced concrete structures.....	204
6.12. Conclusions to section 6 .....	206
7. PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE, REINFORCED CONCRETE AND OTHER BUILDING MATERIALS .....	208
7.1. Samples and methods of their manufacture.....	208
7.2. Equipment, devices and means for sample research.....	216
7.3. Preparation of samples for testing.....	218
7.4. Testing.....	221
7.5. Processing of test results and determination of strength, deformation and structural-mechanical properties of concrete.....	228
7.6. Determination of durability of armocement.....	231
7.7. Determination of mechanical characteristics of steel .....	238
7.8. Determination of mechanical characteristics of ceramic bricks.....	241
7.9. Determination of mechanical characteristics of wood.....	243
7.10. Conclusions to section 7 .....	247
8. DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF CRACK RESISTANCE OF CONCRETE.....	249

8.1. Purpose, tasks and scientific level of methodical recommendations .....	249
8.2. General provisions and samples .....	254
8.3. Samples .....	255
8.4. Equipment, testing and processing of results .....	257
8.4.1. Equipment and tests .....	257
8.5. Testing .....	258
8.6. Processing of test results .....	259
8.7. Determination of crack resistance characteristics during equilibrium tests with fixing of the sizes of the growing main crack and the corresponding current values of loading.....	265
8.8. Equipment for determining the characteristics of crack resistance during equilibrium tests of samples.....	266
8.9. Recommendations for testing specimens during simultaneous stretching and twisting .....	268
8.10. Recommendations for testing concrete for climatic crack resistance (frost resistance) .....	271
8.11. Determination of design parameters of fracture of concretes dispersed with basalt fiber .....	275
8.12. Conclusions to section 8.....	284
9. LONG-TERM RESEARCH OF BUILDING STRUCTURES, FOUNDATIONS AND FOUNDATIONS .....	286
9.1. Field inspections and long-term tests of buildings and structures .....	286
9.2. Inspection and testing of foundations and foundations. ....	293
9.3. Measurement of pressures and stresses in soils.....	295
9.4. Measurement of deformations and filtration of base soils. ....	297
9.5. Geophysical methods of control of bases and rocks .....	300
9.6. Conclusions to section 9.....	303
10. INVESTIGATION OF BRIDGE STRUCTURES.....	305
10.1. Inspection of bridges .....	305
10.2. Static tests of bridges.....	308
10.3. Dynamic tests of bridges. ....	316
10.4. Processing and analysis of results of inspection and testing of bridges.....	320
10.5. The essence of modeling methods and the field of their use.....	332

10.6. Testing of bridges with destruction of structures.....	341
10.7. Conclusions to section 10 .....	349
11. METHODS OF RESEARCH OF PROBABILITY THEO- RY AND MATHEMATICAL STATISTICS .....	351
11.1. Characteristics of random variables.....	351
11.2. Normal distribution.....	354
11.3. Logarithmic-normal distribution.....	360
11.4. The inverse normal distribution and a posteriori distribu- tion of its parameters.....	362
11.5. Gram-Charlet distribution.....	366
11.6. Weibull distribution .....	374
11.7. Poisson distribution.....	378
11.8. Binomial distribution .....	384
11.9. Geometric distribution .....	385
11.10. Conclusions to section 11 .....	388
12. THEORY OF MATHEMATICAL EXPERIMENTAL PLANNING, CORRELATION REGRESSIVE ANALYSIS AND CONSISTENCY CRITERIA.....	390
12.1. Theory of mathematical planning of the experiment .....	390
12.2. Use of correlation-regression analysis to establish the re- lationships between strength characteristics and defor- mations of building structures.....	403
12.3. Consistency criteria.....	407
12.4. Conclusions to section 12 .....	412
13. METHODS OF MODELING AND ANALYSIS OF SYS- TEMS.....	414
13.1. The essence of modeling methods and the field of their use .....	414
13.2. Statistical test method (Monte Carlo method) .....	418
13.3. The main stages of building a model and forming its con- cept.....	420
13.4. Model implementation and simulation results .....	422
13.5. Methods of obtaining pseudo-random numbers with a giv- en distribution law and evenly distributed numbers on a PC .....	424
13.6. Obtaining pseudo-random numbers by the Neumann method and by discrete laws.....	428
13.7. Conclusions to section 13 .....	431

14. MODELING OF BUILDING STRUCTURES .....	433
14.1. General provisions and classification of methods of modeling building structures .....	433
14.2. Basic provisions of physical modeling of building structures .....	435
14.3. Information on the theory of similarity and dimensionality of physical modeling of building structures .....	436
14.4. Specifics of manufacturing physical models of building structures (structures) .....	440
14.5. Model physical researches of building constructions and constructions .....	442
14.6. General provisions of mathematical modeling of building structures .....	447
14.7. Mathematical models of direct analogy of building structures .....	449
14.8. Conclusions to section 14 .....	456
General conclusions .....	458
References .....	467
Briefly about the author .....	482

Наукове видання  
Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний аграрний університет

**Лучко Йосип Йосипович**

## **МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

За редакцією д. т. н., професора Лучка Йосипа Йосиповича

Редактор *Ольга Бойцун*  
Коректор *Вероніка Гуменюк*  
Перекладач *Ірина Грицак*  
Макетування *Іван Кравець*

Підписано до друку 16.09.2020. Формат 60x84/16.

Умов. друк. арк. 31,6. Обл.-вид. арк. 28,5. Наклад 300 прим, № зам. 08/11

Приватне підприємство. «Видавництво «Левада»»

м. Львів, вул. Степана Бандери, 45.

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності серія ДК № 5291 від 08.02.2017.

Друк ТзОВ «Простір М» 79000, Львів, вул. Чайковського 8.

### **Лучко Й. Й.**

Л87 Методи дослідження та випробування будівельних матеріалів і конструкцій [текст]: [Монографія]/ Й. Й. Лучко // 2 вид., перероб. і допов. – Львів: Левада, 2020. – 495 с. ISBN 978-966-914-290-0

У монографії викладено методи та засоби проведення експериментальних досліджень. Розглянуто неруйнівні методи контролю випробувань будівельних конструкцій. Наведені конструкції створених універсальних стендів і стендів контролю якості залізобетонних виробів. Представлено давачі тиску, деформації та нові типи багатофункціональних сенсорів магнітного поля і температури. Описано способи та методи обстеження і випробування матеріалів, конструкцій та споруд. Визначено основні фізико-механічні характеристики будівельних матеріалів, зокрема тріщиностійкості бетонів. Значну увагу приділено методам теорії ймовірності та математичній статистиці. Наведено методи та прийоми фізичного, технічного та математичного моделювання будівельних конструкцій з допомогою електронних і аналогових обчислювальних машин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників, проектувальників, будівельників та експлуатаційників. Книга стане корисною і для викладачів та студентів будівельних спеціальностей.