



Александр СТРИЛЕЦЬ

Заступник директора з НМР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНКО

«28» серпня 2026 р.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з навчальної дисципліни

ОК 17 «Основи розрахунку будівельних конструкцій»

для здобувачів фахової передвищої освіти
спеціальності G19 «Будівництво та цивільна інженерія»
ОПП «Будівництво та експлуатація будівель і споруд»

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Конспект укладено за чинною робочою навчальною програмою ОК 17: 21 тема, 31 двогодинне заняття, разом 62 години лекцій. У 3-му семестрі — 36 годин, у 4-му — 26 годин.

Назви та послідовність тем узгоджено з розділом 6 РНП. Теми з двома заняттями позначено окремо; зміст лекцій

Матеріал орієнтований на навчальні приклади; наведені в підручниках параметри та нормативні припущення в реальному проєктуванні перевіряють за чинними документами.

Основні підручники

- [1] Моргун А. С., Сорока М. М. Будівельна механіка та будівельні конструкції: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2010.
- [2] Павліков А. М. Залізобетонні конструкції: будівлі, споруди та їх частини: підручник. – Полтава: ПолтНТУ, 2017.
- [3] Стовпник С. М., Ган А. Л., Шайдецька Л. В. Будівельні матеріали і конструкції підземних споруд. Основи розрахунку. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.
- [4] Хоменко О. Г. Сталеві конструкції у будівництві: підручник. – Глухів, 2018.
- [5] Гомон С. С. Конструкції із дерева та пластмас: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2016. – 219 с.
- [6] Тютюкін О. Л., Купрій В. П., Дубінчик О. І. Основи та фундаменти: навчальний посібник. – Дніпро: УДУНТ, 2022. – 126 с.

ЗМІСТ

1. Методи розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами
2. Розрахункові схеми, навантаження та внутрішні зусилля
3. Матеріали та основи проєктування дерев'яних конструкцій
4. Розрахунок елементів дерев'яних конструкцій
5. З'єднання дерев'яних конструкцій і конструкції з пластмас
6. Матеріали та основи розрахунку сталевих конструкцій
7. Зварні та болтові з'єднання сталевих конструкцій
8. Сталеві балки, колони та ферми
9. Загальні відомості про кам'яні та армокам'яні конструкції
10. Бетон і його фізико-механічні властивості
11. Арматура, властивості залізобетону та основи його розрахунку
12. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів
13. Розрахунок залізобетонних елементів за похилими перерізами
14. Стиснуті та розтягнуті залізобетонні елементи
15. Тріщиностійкість і деформативність залізобетонних елементів
16. Плоскі залізобетонні перекриття
17. Типи фундаментів і вихідні дані для їх проєктування
18. Розрахунок фундаментів мілкового закладання
19. Котловани та захист від підземних вод

20. Проектування і розрахунок пальових фундаментів

21. Спорудження пальових фундаментів

Позначення, що найчастіше зустрічаються

Позначення	Зміст	Типові одиниці
N	поздовжня сила	кН
Q, V	поперечна сила	кН
M	згинальний момент	кН·м
q	розподілене навантаження	кН/м
F, P	зосереджена сила	кН
A	площа перерізу	мм ² , см ²
I	момент інерції	мм ⁴ , см ⁴
W	момент опору	мм ³ , см ³
E	модуль пружності	МПа
R, f	розрахунковий опір (міцність)	МПа
b, h	ширина і висота перерізу	мм
l, l ₀	проліт і розрахункова довжина	м, мм
A _s	площа поздовжньої арматури	мм ²
σ, τ	нормальні та дотичні напруження	МПа

Частина I. Лекції 3-го семестру — 36 годин

Лекція 1. Методи розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: сформувати розуміння призначення розрахунку, розвитку основних методів, змісту двох груп граничних станів і ролі коефіцієнтів надійності.

Заняття 1 (2 години). Призначення розрахунку та дві групи граничних станів.

Заняття 2 (2 години). Характеристичні величини, коефіцієнти й послідовність перевірки.

План

1. Призначення розрахунку будівельних конструкцій.
2. Розвиток методів розрахунку.
3. Сутність методу граничних станів.
4. Перша і друга групи граничних станів.
5. Характеристичні та розрахункові значення.
6. Коефіцієнти надійності й загальна послідовність перевірки.

Навчальний матеріал

Матеріал подано в послідовності, потрібній для розуміння основ теми й виконання типових навчальних розрахунків. Спочатку розглянуто вихідні поняття, далі — розрахункові залежності, схеми та практичний порядок їх застосування.

1. Призначення розрахунку будівельних конструкцій

Будівельна конструкція повинна безпечно сприймати навантаження протягом передбаченого строку експлуатації. Розрахунок установлює внутрішні зусилля, напруження, деформації та переміщення, після чого дає змогу обґрунтувати матеріал, форму й розміри перерізів. За підручником [3], метою розрахунку є забезпечення міцності, жорсткості та стійкості за раціональної витрати матеріалів і праці.

Розрахункова модель поєднує три сторони роботи споруди. Статична сторона пов'язує зовнішні дії з реакціями та внутрішніми зусиллями. Геометрична сторона встановлює зв'язок між переміщеннями й деформаціями. Фізична сторона описує залежність між напруженнями та деформаціями матеріалу. Недостатньо правильно виконати обчислення: вихідна схема має відповідати реальній роботі конструкції.

Перевірки виконують для всіх характерних стадій: виготовлення, транспортування, монтажу та експлуатації. На різних стадіях можуть змінюватися опори, напрям і місце прикладання навантажень, а також розрахункова довжина елемента. Тому для одного елемента іноді складають кілька розрахункових схем.

2. Розвиток методів розрахунку

Методи розрахунку розвивалися від використання одного узагальненого запасу до окремого врахування мінливості навантажень, міцності матеріалів і умов роботи. Ця послідовність пояснює переваги сучасного методу граничних станів.

2.1. Метод допустимих напружень

У методі допустимих напружень матеріал розглядають переважно як пружний, а найбільші нормальні й дотичні напруження обмежують допустимими значеннями. Допустимі напруження одержують діленням граничної характеристики матеріалу на загальний коефіцієнт запасу.

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \tau \leq [\tau]$$

Перевагою методу є простота. Недолік полягає в тому, що один запас не розділяє невизначеність навантаження, розкид міцності матеріалу та вплив реальних умов роботи. Метод також недостатньо повно характеризує конструкції, для яких важливі непружні деформації, тріщиностійкість або обмеження прогинів.

2.2. Метод руйнівних зусиль

Метод руйнівних зусиль оцінює граничну стадію роботи перерізу й порівнює зусилля від експлуатаційних навантажень із руйнівним зусиллям, зменшеним загальним коефіцієнтом запасу. Він краще враховує перерозподіл напружень, однак не відокремлює різні причини невизначеності та сам по собі не гарантує нормальної експлуатації.

2.3. Метод граничних станів

Сучасний підхід наперед визначає стани, яких конструкція не повинна досягати. Надійність забезпечують системою диференційованих коефіцієнтів. Вони окремо враховують можливе відхилення навантаження від характеристичного значення, мінливість властивостей матеріалу, призначення споруди та особливості роботи елемента.

Джерело підрозділу: [3, с. 8–12].

3. Поняття граничного стану

Граничний стан — це стан, після досягнення якого конструкція або її елемент перестає задовольняти встановлені вимоги. Причиною може бути руйнування, втрата стійкості, надмірне переміщення, утворення або надмірне розкриття тріщин. Отже, граничний стан не завжди означає обвалення; він є межею допустимої роботи.

Загальна умова надійності вимагає, щоб розрахунковий ефект дії не перевищував розрахункової несучої здатності:

$$S_d \leq R_d$$

Ліва частина залежить від навантажень, розрахункової схеми та їхніх сполучень. Права частина залежить від міцності матеріалу, геометрії перерізу, умов роботи й можливих ослаблень. Рівність означає використання несучої здатності; перевищення лівої частини свідчить про невиконання умови.

4. Групи граничних станів

Граничні стани поділяють на дві групи за характером наслідків. Перша група пов'язана з безпекою та збереженням несучої здатності, друга — з можливістю нормально користуватися спорудою без надмірних деформацій, тріщин або коливань.

4.1. Перша група

До першої групи належать стани, пов'язані з втратою несучої здатності або непридатністю до подальшої експлуатації: руйнування перерізу, втрата загальної чи місцевої стійкості, перетворення системи на механізм, крихке або втомне руйнування, надмірні залишкові деформації. Розрахунок за цією групою забезпечує безпеку.

4.2. Друга група

До другої групи належать стани, що порушують нормальну експлуатацію: надмірні прогини та переміщення, неприпустимі коливання, утворення або розкриття тріщин, деформації, які пошкоджують оздоблення чи перешкоджають роботі обладнання. Конструкція може ще не втратити міцності, але вже не виконувати своєї функції.

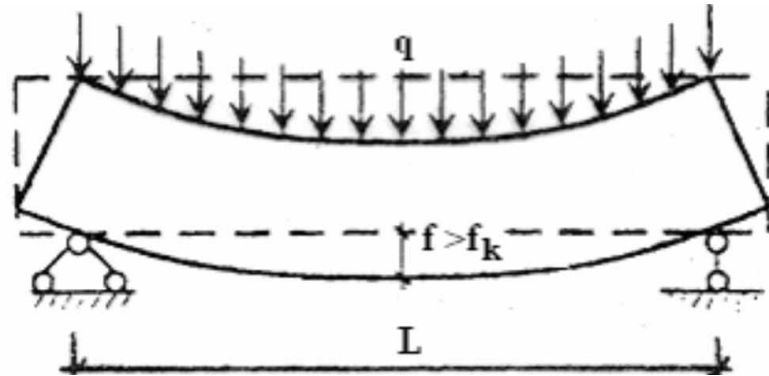


Рисунок 1.1 – Недопустимий прогин конструкції як приклад граничного стану другої групи (джерело: [3], с. 13, рис. 1.4)

На рисунку 1.1 несуча система не зруйнована, проте фактичний прогин перевищує граничний. Такий приклад показує, чому перевірку міцності не можна вважати достатньою без перевірки жорсткості.

5. Характеристичні та розрахункові значення

Характеристичне значення навантаження F_k установлюють як базове значення, прийняте для заданої ймовірності несприятливого відхилення. Для розрахунку його перетворюють на F_d за допомогою коефіцієнта надійності за навантаженням.

$$F_d = \gamma_f F_k$$

Характеристичний опір R_k відображає гарантований рівень міцності матеріалу. Розрахунковий опір одержують його зменшенням за допомогою коефіцієнта надійності матеріалу.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m}$$

У позначеннях підручника [3] загальний перехід до розрахункового опору може додатково враховувати коефіцієнт надійності за призначенням та коефіцієнт умов роботи:

$$R_d = \frac{R_n \gamma_n \gamma_c}{\gamma_m}$$

Конкретний запис залежить від матеріалу та прийнятої нормативної моделі. Під час реального проектування числові значення коефіцієнтів потрібно брати з чинних норм; у конспекті пояснюється їхній зміст і місце в розрахунку.

6. Послідовність перевірки за граничними станами

- визначити призначення, відповідальність і стадію роботи конструкції;
- скласти розрахункову схему та встановити навантаження і сполучення;
- одержати реакції, внутрішні зусилля та переміщення;
- вибрати характеристики матеріалу й геометричні характеристики перерізу;
- виконати перевірки першої групи за міцністю та стійкістю;
- виконати перевірки другої групи за деформаціями, тріщинами або коливаннями;
- за невиконання хоча б однієї умови змінити переріз, матеріал або конструктивну схему й повторити розрахунок.

Висновки

- метод граничних станів перевіряє і безпеку, і придатність конструкції до нормальної експлуатації;
- перша група обмежує втрату несучої здатності, друга — неприпустимі деформації та інші експлуатаційні порушення;
- характеристичні значення перетворюють на розрахункові системою коефіцієнтів надійності;
- достовірність результату залежить не лише від формул, а й від правильної розрахункової схеми та вихідних даних.

Контрольні запитання

1. Яку мету має розрахунок будівельної конструкції?
2. У чому недолік одного загального коефіцієнта запасу?
3. Що називають граничним станом?
4. Які явища належать до першої групи граничних станів?
5. Які явища належать до другої групи?
6. Чим характеристичне значення відрізняється від розрахункового?
7. Які дані впливають на ліву і праву частини умови $S_d \leq R_d$?
8. Чому потрібно перевіряти стадії транспортування й монтажу?

Лекція 2. Розрахункові схеми, навантаження та внутрішні зусилля

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: навчити переходити від реальної конструкції до розрахункової схеми, розпізнавати опори й основні стержневі системи, класифікувати навантаження та визначати внутрішні зусилля методом перерізів.

Заняття 1 (2 години). Розрахункова схема, опори, реакції та внутрішні зусилля.

Заняття 2 (2 години). Види навантажень і просте сполучення на елементі перекриття.

План

1. Реальна конструкція та її розрахункова схема.
2. Опори, в'язі та кінематичний аналіз.
3. Балки, рами й ферми.
4. Навантаження та їх розрахункові значення.
5. Опорні реакції й внутрішні зусилля.
6. Метод перерізів та епюри N , Q , M .

Навчальний матеріал

Матеріал подано в послідовності, потрібній для розуміння основ теми й виконання типових навчальних розрахунків. Спочатку розглянуто вихідні поняття, далі — розрахункові залежності, схеми та практичний порядок їх застосування.

1. Розрахункова схема та ідеалізація

Реальна будівля має просторову форму, вузли кінцевих розмірів, неоднорідні матеріали та другорядні деталі. Для розрахунку її замінюють моделлю, яка зберігає істотні ознаки: геометрію осей, характер опор, спосіб з'єднання елементів, жорсткість і прикладені дії. Надмірно складна модель ускладнює розрахунок, а надмірно спрощена може спотворити роботу системи.

Плоску схему застосовують, коли осі елементів і навантаження лежать в одній площині. Балку подають стержнем, геометричні характеристики якого зосереджені на осі. Раму моделюють системою стержнів із жорсткими або шарнірними вузлами. У фермі стержні ідеалізують прямими, а навантаження прикладають переважно у вузлах.

Шарнір допускає взаємний поворот елементів і в ідеалізованій схемі не передає згинального моменту. Жорсткий вузол зберігає кут між елементами й передає момент. Помилкова заміна одного виду вузла іншим змінює реакції та внутрішні зусилля в усій системі.

2. Опори, в'язі й реакції

В'язь обмежує певне можливе переміщення, а сила у в'язі є реакцією. У плоскій задачі шарнірно-рухома опора створює одну реакцію; шарнірно-нерухома — дві складові; жорстке защемлення передає горизонтальну й вертикальну реакції та згинальний момент.

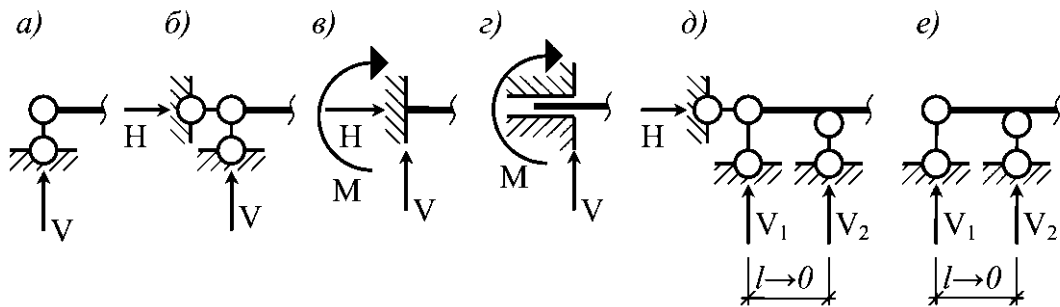


Рисунок 2.1 – Основні види опорних закріплень плоских систем (джерело: [1], с. 9, рис. 1.1.1)

Напрямок невідомої реакції під час складання рівнянь рівноваги можна прийняти довільно. Від’ємний результат означає, що фактичний напрям протилежний. Кількість складових реакції повинна відповідати кількості переміщень, які забороняє опора.

3. Кінематичний аналіз

Розрахункова система має бути геометрично незмінною. Геометрично змінна система перетворюється на механізм і може отримувати великі переміщення без відповідних деформацій стержнів. Тому перед силовим розрахунком оцінюють кількість і розташування в’язей.

Плоский диск має три ступені вільності: два поступальні переміщення та один поворот. Для системи з D дисків, S_h простих шарнірів і C_0 опорних стержнів застосовують формулу П. Л. Чебишова:

$$W = 3D - 2S_h - C_0$$

Для плоскої ферми з Y вузлів, C внутрішніх стержнів і C_0 опорних стержнів використовують:

$$W = 2Y - C - C_0$$

Умова $W \leq 0$ є необхідною, але недостатньою. Потрібно перевірити геометричне розташування в’язей: паралельні стержні або стержні, осі яких перетинаються в одній точці, можуть не усувати рух системи. Кінематичний аналіз тому складається з кількісної та якісної перевірок.

4. Основні типи стержневих систем

Тип системи визначає, які внутрішні зусилля потрібно знаходити та які припущення можна застосувати.

4.1. Балка

Балка — стержневий елемент, у якому переважає згин. Від поперечного навантаження виникають поперечна сила Q і згинальний момент M . Поздовжня сила N з’являється, якщо навантаження має складову вздовж осі. Балки бувають однопрогоновими, консольними, нерозрізними й шарнірно-консольними.

4.2. Рама

Рама складається зі стержнів, з’єднаних переважно жорсткими вузлами. У ригелях і стояках можуть одночасно діяти N , Q і M . Рами сприймають вертикальні та горизонтальні навантаження, а жорсткість вузлів забезпечує просторову або плоску спільну роботу елементів.

4.3. Ферма

Ферма є геометрично незмінною системою прямих стержнів. Якщо вузли прийняті шарнірними, навантаження прикладене у вузлах, а осі стержнів перетинаються в центрах вузлів, у стержнях виникають переважно поздовжні сили розтягу або стиску. Відхилення від цих передумов спричиняє додаткові згинальні моменти.

5. Навантаження та впливи

Навантаження викликають реакції, внутрішні зусилля й деформації. За способом прикладання вони бувають зосередженими силами, розподіленими навантаженнями та моментами. Рівномірно розподілене навантаження q вимірюють у кН/м, поверхневе — у кН/м², зосереджену силу — у кН.

За тривалістю та характером дії [3] розрізняє постійні, тимчасові й особливі навантаження. До постійних належать власна вага конструкцій і тиск ґрунту. Тимчасові поділяють на довготривалі та короткочасні. Особливі навантаження пов'язані з рідкісними аварійними або сейсмічними впливами.



Рисунок 2.2 – Класифікація навантажень і впливів (джерело: [3], с. 14, рис. 1.5)

Характеристичне навантаження перетворюють на розрахункове за допомогою коефіцієнта надійності:

$$q_d = \gamma_f q_k$$

Кілька дій можуть діяти одночасно, тому розглядають їхні сполучення. Основне сполучення охоплює постійні та найбільш несприятливі тимчасові дії. Для кожної перевірки обирають таке сполучення, яке створює найбільший несприятливий ефект.

6. Визначення опорних реакцій

Для статично визначеної плоскої системи реакції знаходять із трьох незалежних рівнянь рівноваги. Перед складанням рівнянь показують усі задані навантаження, замінюють опори реакціями та задають додатні напрями осей і моментів.

$$\sum X = 0, \quad \sum Y = 0, \quad \sum M = 0$$

Доцільно спочатку складати рівняння моментів відносно точки, у якій перетинаються лінії дії двох невідомих реакцій. Після визначення реакцій виконують перевірку невикористаним рівнянням рівноваги. Розмірність реакцій — кН, моментів — кН·м.

7. Внутрішні зусилля та метод перерізів

Внутрішні зусилля характеризують взаємодію частин елемента. Поздовжня сила N спрямована вздовж осі, поперечна сила Q — перпендикулярно до неї, згинальний момент M прагне зігнути елемент. Для їх визначення елемент умовно розрізають у потрібному перерізі й одну частину відкидають.

У перерізі прикладають N , Q і M , після чого для залишеної частини складають рівняння рівноваги. Схематично це можна записати так:

$$N = \sum X, \quad Q = \sum Y, \quad M = \sum M_i$$

Знаки внутрішніх зусиль задають прийнятим правилом. Додатна N зазвичай відповідає розтягу; знак Q і M пов'язують із прийнятою орієнтацією осей і стороною перерізу. Головна вимога — послідовно застосовувати одне правило й правильно будувати епюри.

8. Епюри N , Q і M

Епюра показує зміну внутрішнього зусилля вздовж осі елемента. На ділянці без розподіленого навантаження Q є сталою, а M змінюється лінійно. За рівномірно розподіленого навантаження Q змінюється лінійно, а M — за параболою. У місці зосередженої сили епюра Q має стрибок, у місці прикладеного моменту стрибок має епюра M .

Для контролю використовують диференціальні залежності між q , Q і M : навантаження визначає швидкість зміни поперечної сили, а поперечна сила — швидкість зміни моменту. Екстремум M на гладкій ділянці відповідає точці, де Q дорівнює нулю.

- розбити елемент на ділянки між зосередженими силами, моментами, опорами та межами зміни q ;
- записати $N(x)$, $Q(x)$, $M(x)$ для кожної ділянки;
- обчислити значення на межах і в характерних точках;
- побудувати епюри з указанням знаків, одиниць і максимальних значень;
- перевірити стрибки й характер кривих відповідно до прикладених дій.

Висновки

- розрахункова схема повинна зберігати істотні особливості реальної конструкції;
- тип опори визначає кількість і напрям реакцій;
- кінематичний аналіз передусє силовому розрахунку;
- навантаження класифікують за способом прикладання, тривалістю та розрахунковою роллю;
- внутрішні зусилля визначають методом перерізів, а їх зміну подають епюрами.

Контрольні запитання

1. Що має зберігати розрахункова схема реальної конструкції?
2. Які реакції створюють три основні типи плоских опор?
3. Чому умова $W \leq 0$ не є достатньою для геометричної незмінності?
4. Чим відрізняються балка, рама і ферма?
5. Як класифікують навантаження за тривалістю дії?
6. Які рівняння використовують для визначення реакцій плоскої системи?
7. У чому полягає метод перерізів?
8. Як змінюються Q і M на ділянці з рівномірним навантаженням?

Лекція 3. Матеріали та основи проєктування дерев'яних конструкцій

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: розглянути конструкційні матеріали з деревини, анізотропію, вплив вологості й тривалості навантаження, експлуатаційні класи, розрахункові опори та основні заходи довговічності.

План

1. Матеріали для дерев'яних конструкцій.
2. Переваги й обмеження деревини.
3. Анізотропія, вологість і вади.
4. Експлуатаційні класи та тривалість навантаження.
5. Характеристичні й розрахункові властивості.
6. Загальні принципи проєктування та захисту.

Навчальний матеріал

Матеріал подано в послідовності, потрібній для розуміння основ теми й виконання типових навчальних розрахунків. Спочатку розглянуто вихідні поняття, далі — розрахункові залежності, схеми та практичний порядок їх застосування.

1. Матеріали для дерев'яних конструкцій

Для несучих конструкцій застосовують круглий ліс, пиломатеріали прямокутного перерізу, суцільну й клеєну деревину. Найпоширеніші хвойні породи — сосна, ялина, модрина та ялиця. Прямокутний переріз зручний для виготовлення, стикування й контролю розмірів. Клеєна деревина дає змогу одержувати елементи значної довжини та висоти з більш рівномірними властивостями.

Фанеру й плитні матеріали на основі деревини використовують як обшивки, настили та стінки легких панелей. До них належать деревоволокнисті, деревостружкові, цементно-стружкові та інші плити. Їх вибирають за міцністю, жорсткістю, вологостійкістю й сумісністю з каркасом.

Клей повинен забезпечувати спільну роботу шарів і відповідати температурно-вологісним умовам. У підручнику [5] розглянуто резорцинові, фенольно-резорцинові, фенольні та інші синтетичні клеї. Якість поверхні, режим пресування і витримування безпосередньо впливають на міцність шва.

2. Переваги й обмеження деревини

До переваг деревини належать мала власна вага, висока питома міцність, простота механічної обробки, можливість індустріального виготовлення та порівняно низька теплопровідність. Дерев'яні конструкції можуть перекривати значні прогони, а клеєні елементи дають змогу формувати криволінійні обриси.

Основні обмеження пов'язані з анізотропією, неоднорідністю, чутливістю до зволоження, усушкою і набуханням, біологічним пошкодженням та горючістю. Дефекти — сучки, тріщини, косошарість — знижують міцність і повинні враховуватися сортуванням та обмеженням зон розташування.

Деревина добре працює на стиск і розтяг уздовж волокон, але значно слабше — на розтяг поперек волокон і сколювання. Тому вузли проєктують так, щоб уникати поперечного розтягу й концентрації напружень, а навантаження передавалося через достатню площу контакту.

3. Анізотропія, вологість і деформації

Деревина є природним анізотропним матеріалом. Властивості вздовж волокон відрізняються від властивостей поперек волокон, тому в позначенні міцності завжди вказують напрям: $f_{t,0}$ — розтяг уздовж волокон; $f_{c,0}$ — стиск уздовж; $f_{c,90}$ — стиск поперек; f_m — згин; f_v — зсув.

Вологість впливає на міцність, жорсткість і розміри. Під час висихання нижче межі насичення волокон дерева усухає, під час зволоження — набухає. Зміни поперек волокон значно більші, ніж уздовж, тому деталі повинні мати можливість деформуватися без розколювання або втрати контакту.

Під тривалим навантаженням деформації зростають у часі. Це явище враховують під час перевірки прогинів і стійкості. Комбінація високої вологості та тривалої дії навантаження є особливо несприятливою.

4. Експлуатаційні класи

Підручник [5] розподіляє умови роботи за експлуатаційними класами. Перший клас відповідає сухим опалюваним умовам, де середня вологість дерева низька. Другий — умовам, у яких можливе періодичне підвищення вологості. Третій охоплює зовнішню експлуатацію або тривале зволоження.

Клас установлюють не за назвою будівлі, а за фактичними температурно-вологісними умовами конкретного елемента. У межах однієї споруди покриття над сухим приміщенням і зовнішній навіс можуть належати до різних класів.

5. Класи тривалості навантаження

Міцність дерева залежить від тривалості дії. У [5] навантаження розглядають як постійні, довготривалі, середньотривалі, короткотривалі та миттєві. Чим довше діє навантаження, тим меншу розрахункову міцність доцільно приймати.

Якщо сполучення містить кілька навантажень різної тривалості, модифікаційний коефіцієнт визначають для дії, яка має найкоротший клас тривалості серед тих дій, що формують розглядуваний розрахунковий ефект. При цьому обов'язково враховують експлуатаційний клас.

Джерело підрозділів 3–5: [5, с. 8–10].

6. Характеристичні й розрахункові властивості

Клас міцності дерева задає характеристичні опори та модулі пружності. Позначення S використовують для хвойної дерева, D — для листяної. Число класу пов'язане з характеристичною міцністю на згин. Для розрахунку потрібне не лише число класу, а й конкретна характеристика відповідно до виду роботи.

Характеристичний опір f_k перетворюють на розрахунковий з урахуванням модифікаційного коефіцієнта k_{mod} і коефіцієнта надійності матеріалу γ_M :

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_M}$$

Коефіцієнт k_{mod} урахує тривалість навантаження та експлуатаційний клас. γ_M урахує статистичну мінливість властивостей матеріалу й надійність прийнятої моделі. Для різних матеріалів на основі дерева ці значення можуть відрізнятися.

Густина впливає на власну вагу та роботу з'єднань. Її визначають як відношення маси до об'єму:

$$\rho_k = \frac{m}{V}$$

Для розрахунку власної ваги використовують установлену густину матеріалу, а не довільне середнє значення. Для кріплень густина може впливати на опір зминанню деревини.

7. Загальні принципи проєктування

- забезпечити чіткий шлях передавання навантажень від настилу й другорядних елементів до головних конструкцій та опор;
- розташовувати елементи так, щоб переважала робота вздовж волокон;
- уникати різких ослаблень, поперечного розтягу та скупчення отворів у небезпечних перерізах;
- забезпечити просторову незмінність системою в'язей;
- урахувати монтажні стадії та можливе зволоження під час будівництва;
- передбачити доступ до вузлів для огляду й захисту.

8. Довговічність і захист

Конструктивний захист є першим засобом довговічності. Потрібно відводити воду, не допускати капілярного підсмоктування, забезпечувати провітрювання закритих порожнин і відокремлювати деревину від вологого бетону або ґрунту. Торці та місця спирання потребують особливої уваги.

Хімічний захист застосовують, коли конструктивних заходів недостатньо. Вогнезахист може забезпечуватися просоченням, покриттям або облицюванням. Під час пожежі зовнішній шар деревини обвуглюється; зменшення робочого перерізу враховують спеціальним розрахунком, але основою є правильне конструктивне рішення.

Джерело підрозділів 6–8: [5, с. 9–13].

Висновки

- деревина є легким і ефективним, але анізотропним та вологозалежним матеріалом;
- вид роботи відносно волокон визначає потрібну характеристику міцності;
- розрахунковий опір залежить від класу міцності, тривалості навантаження й експлуатаційного класу;
- довговічність забезпечують передусім відведенням вологи, вентиляцією та правильним конструюванням вузлів.

Контрольні запитання

1. Які матеріали застосовують у дерев'яних конструкціях?
2. Які переваги має клеєна деревина?
3. Що означає анізотропія деревини?
4. Як вологість впливає на міцність і розміри?
5. Чим відрізняються три експлуатаційні класи?
6. Навіщо враховують тривалість навантаження?
7. Як одержують розрахунковий опір f_d ?
8. Які конструктивні заходи підвищують довговічність?

Основне джерело лекції: [5, с. 6–13].

Лекція 4. Розрахунок елементів дерев'яних конструкцій

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: засвоїти базові перевірки дерев'яних елементів на розтяг, стиск, стійкість, згин, зсув, прогин, комбіновану дію та зминання.

Заняття 1 (2 години). Розтяг, стиск і стійкість дерев'яного елемента.

Заняття 2 (2 години). Згин, комбінована дія, місцеве зминання і сколювання.

План

1. Вихідні дані та геометричні характеристики.
2. Центральньо-розтягнуті елементи.
3. Центральньо-стиснуті елементи та стійкість.
4. Згинальні елементи.
5. Комбінована дія зусиль.
6. Стиск під кутом і поперек волокон.
7. Загальний алгоритм перевірки.

Навчальний матеріал

Матеріал подано в послідовності, потрібній для розуміння основ теми й виконання типових навчальних розрахунків. Спочатку розглянуто вихідні поняття, далі — розрахункові залежності, схеми та практичний порядок їх застосування.

1. Вихідні дані

Для розрахунку потрібні схема, внутрішні зусилля, форма й розміри перерізу, ослаблення, клас міцності, експлуатаційний клас і тривалість навантаження. Розрахунковий опір вибирають саме для перевірюваного виду роботи: розтягу, стиску, згину, зсуву або стиску поперек волокон.

Геометричні характеристики також залежать від перевірки. Для осьового розтягу використовують площу нетто A_{net} ; для стиску — площу A та характеристики стійкості; для згину — момент опору W ; для прогину — момент інерції I ; для стійкості — радіус інерції i та розрахункову довжину l_0 .

Джерело підрозділу: [5, с. 9–13].

2. Центральньо-розтягнуті елементи

Розтягнутий елемент перевіряють у найбільш ослабленому перерізі. Отвори, вирізи та пази зменшують робочу площу, тому використовують площу нетто. Умова міцності вздовж волокон:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_t}{A_{net}} \leq f_{t,0,d}$$

У небезпечному перерізі потрібно врахувати всі ослаблення, які перетинає розрахункова площа. Отвори, розташовані зі зміщенням, можуть потрапляти до різних можливих площин руйнування. Додатково перевіряють зону з'єднання, де виникають концентрація напружень і небезпека розколювання.

3. Центральні-стиснуті елементи

Для стиснутого стержня потрібно розрізняти вичерпання міцності матеріалу й втрату стійкості форми. Короткі елементи переважно визначає міцність, довгі та гнучкі — стійкість, тому обидві перевірки виконують послідовно.

3.1. Перевірка міцності

Для короткого елемента або перерізу, де втрата стійкості не визначальна, середнє напруження стиску не повинно перевищувати розрахунковий опір уздовж волокон:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_c}{A} \leq f_{c,0,d}$$

Площу приймають відповідно до характеру ослаблення. Якщо ослаблення заповнене деталлю, яка передає зусилля й перешкоджає місцевій деформації, порядок урахування може відрізнятися; це вирішують за моделлю вузла.

3.2. Перевірка стійкості

Довгий стиснутий стержень може втратити стійкість раніше, ніж матеріал досягне опору стиску. Гнучкість визначають відносно кожної головної осі:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

Розрахункова довжина l_0 залежить від закріплення кінців і наявності проміжних в'язей. Радіус інерції i визначають за геометрією перерізу. Відносну гнучкість обчислюють з урахуванням характеристичної міцності й модуля пружності:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0.05}}}$$

За відносною гнучкістю встановлюють коефіцієнт стійкості k_c . Перевірку виконують для обох головних напрямів:

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c f_{c,0,d}$$

Найнебезпечнішим є напрям із меншим запасом. Просторові в'язі можуть істотно зменшити розрахункову довжину, але їхня жорсткість і закріплення мають бути конструктивно забезпечені.

4. Згинальні елементи

Згинальний елемент перевіряють за трьома взаємопов'язаними вимогами: міцністю крайніх волокон, опором сколюванню в приопорних зонах і жорсткістю. Виконання лише однієї з цих умов не підтверджує придатності балки.

4.1. Міцність за нормальними напруженнями

Для балки спочатку визначають найбільший розрахунковий момент. Нормальні напруження у крайньому волокні порівнюють з опором згину:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{net}} \leq f_{m,d}$$

Ослаблення біля розтягнутої крайки є особливо небезпечним. Для прямокутного перерізу момент опору залежить від квадрата висоти, тому збільшення висоти зазвичай ефективніше за збільшення ширини.

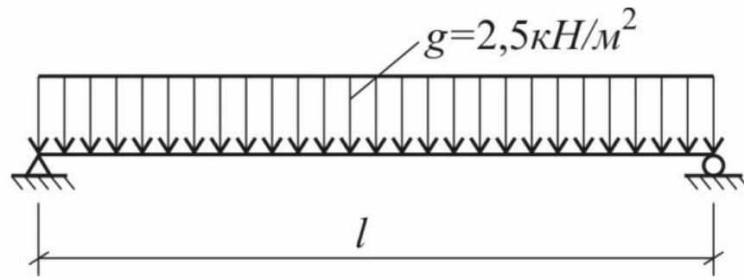


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема дерев'яної балки під рівномірним навантаженням (джерело: [5], с. 27, рис. 2.1)

4.2. Сколювання

Поперечна сила створює дотичні напруження. Для прямокутної балки найбільше значення виникає біля нейтральної осі. Загальна перевірка має вигляд:

$$\tau_d = \frac{V_d S}{I b} \leq f_{v,d}$$

Особливо уважно перевіряють приопорні зони, місця підрізків, отворів і різкої зміни висоти. У цих ділянках простий розподіл напружень може порушуватися, тому потрібні конструктивні обмеження та додаткові перевірки.

4.3. Жорсткість

Прогин визначають від нормативних або встановлених для другої групи сполучень. Він не повинен перевищувати граничного значення:

$$w \leq w_{lim}$$

У розрахунку враховують миттєву й тривалу складові деформації. Недостатня жорсткість може спричинити пошкодження перегородок, покриття або оздоблення навіть за достатньої міцності.

Джерело підрозділів 2–4: [5, с. 25–29].

5. Комбінована дія

Комбінована дія виникає, коли в перерізі одночасно діють кілька складових напружень. Їх не перевіряють окремо без взаємного впливу, а зводять до умов взаємодії, де кожна складова віднесена до відповідного розрахункового опору.

5.1. Розтяг зі згином

Коли поздовжня сила не проходить через центр ваги або елемент одночасно сприймає осьове й поперечне навантаження, нормальні напруження від розтягу та згину підсумовують у безрозмірній умові:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Кожну складову ділять на відповідний розрахунковий опір. У двовісному згині коефіцієнт k_m враховує перерозподіл напружень і неоднорідність матеріалу.

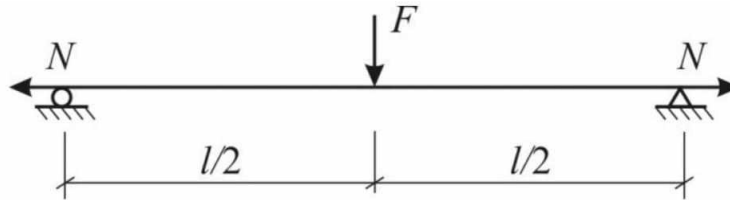


Рисунок 4.2 – Схема сумісної дії розтягу і згину (джерело: [5], с. 53, рис. 2.5)

5.2. Косий згин

Якщо площина навантаження не збігається з головною площиною перерізу, момент розкладають на складові відносно осей y і z . Підручник [5] наводить дві взаємні умови:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Перевірка потрібна для обох комбінацій, оскільки різні крайні точки перерізу можуть бути небезпечними. Якщо одна складова моменту дорівнює нулю, умови переходять до звичайного одновісного згину.

Джерело підрозділу: [5, с. 49–53].

6. Стиск поперек волокон і під кутом

У місцях спирання, контакту у вузлах і під опорними деталями деревина працює на зминання. Розрахункове напруження визначають за ефективною площею контакту:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_c}{A_{ef}} \leq f_{c,\alpha,d}$$

Опір залежить від кута між напрямом сили та волокнами. Найвищий опір зазвичай має стиск уздовж волокон, нижчий — поперек. Ефективна площа може враховувати розподіл тиску за межі фактичного контакту лише в межах, установлених розрахунковою моделлю.

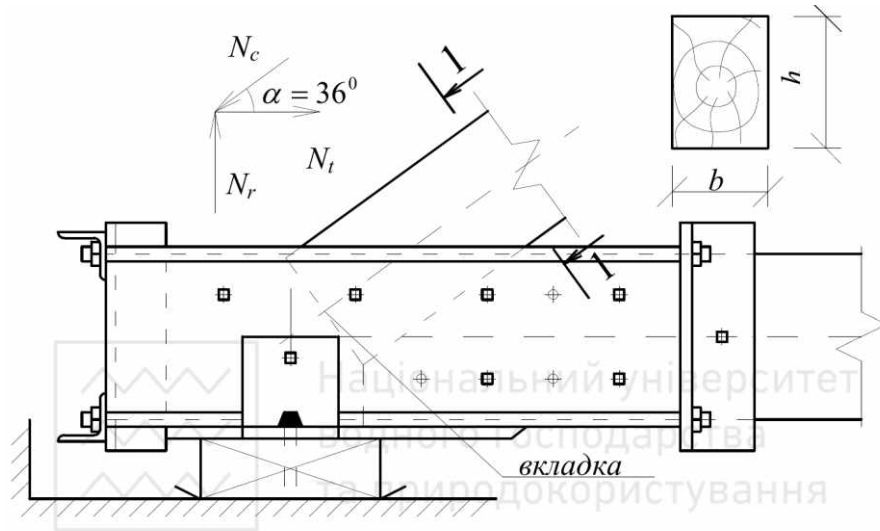


Рисунок 4.3 – Опорний вузол ферми з ділянками стиску під кутом і поперек волокон (джерело: [5], с. 72, рис. 2.7)

Для вузла на рисунку 4.3 окремо визначають ділянки контакту, кути до волокон і відповідні опори. Не можна перевіряти весь вузол одним середнім напруженням, якщо різні поверхні мають різний напрям роботи деревини.

Джерело підрозділу: [5, с. 69–73].

7. Загальний алгоритм

- визначити розрахункові сполучення та внутрішні зусилля;
- вибрати клас деревини, k_{mod} , γ_M і потрібні розрахункові опори;
- установити розрахункові та ослаблені площі, W , I , i і i_0 ;
- перевірити міцність за основним видом роботи;
- для стиснутих елементів перевірити стійкість у двох напрямках;
- для балок перевірити згин, сколювання та прогин;
- для вузлів перевірити зминання, сколювання й ослаблені перерізи;
- за потреби змінити переріз, схему в'язей або конструкцію вузла.

Висновки

- кожен вид напруженого стану потребує свого розрахункового опору;
- ослаблення є визначальними для розтягнутих елементів і зон з'єднань;
- стиснуті елементи перевіряють і за міцністю, і за стійкістю;
- балки перевіряють за згином, сколюванням і прогином;
- у місцях контакту обов'язково враховують напрям сили відносно волокон.

Контрольні запитання

1. Які вихідні дані потрібні для розрахунку дерев'яного елемента?
2. Чому розтягнутий елемент перевіряють за площею нетто?
3. Від чого залежить гнучкість стиснутого стержня?
4. Чому міцності недостатньо для довгого стиснутого елемента?
5. Які три перевірки є основними для балки?
6. Коли виникає косий згин?

7. Як ураховують стиск під кутом до волокон?

8. Які зони балки є найнебезпечнішими за сколюванням?

Основні джерела лекції: [5, с. 9–13, 25–29, 49–53, 69–73].

Лекція 5. З'єднання дерев'яних конструкцій і конструкції з пластмас

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: розглянути роботу врубок, нагельних, болтових, клейових і податливих з'єднань, а також матеріали, конструктивні форми та базові перевірки конструкцій із пластмас.

План

1. Призначення та вимоги до з'єднань.
2. З'єднання на врубках.
3. Нагельні й болтові з'єднання.
4. Клейові з'єднання.
5. Складені елементи на податливих в'язях.
6. Матеріали та конструкції з пластмас.
7. Послідовність проектування вузла.

Навчальний матеріал

Матеріал подано в послідовності, потрібній для розуміння основ теми й виконання типових навчальних розрахунків. Спочатку розглянуто вихідні поняття, далі — розрахункові залежності, схеми та практичний порядок їх застосування.

1. Призначення і вимоги

З'єднання передає зусилля між елементами та забезпечує спільну роботу конструкції. Вузол повинен мати достатню несучу здатність, жорсткість і довговічність, бути технологічним у виготовленні, доступним для контролю й не створювати умов для накопичення вологи.

Отвори, врубки та пази ослаблюють переріз. Збільшення кількості кріплень не завжди підвищує несучу здатність: мала відстань між отворами або від отвору до крайки може спричинити розколювання. Конструювання і розрахунок вузла виконують одночасно.

Основні механізми руйнування: зминання деревини, згин або зріз кріплення, сколювання, розколювання, розрив ослабленого перерізу та руйнування клейового шва. Розрахунок повинен охоплювати кожен механізм, який можливий у конкретному вузлі.

2. З'єднання на врубках

Врубки застосовують переважно у вузлах брусів і колод. Зусилля передається безпосереднім контактом деревини, тому визначальними є стиск контактної поверхні та сколювання вздовж волокон. Геометрія врубки повинна забезпечувати щільний контакт і не створювати надмірного ослаблення.

У лобовій врубці розкіс передає стиск на опорну площадку нижнього пояса. Перевірку контактної поверхні виконують за умовою:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_c}{A_n} \leq f_{c,\alpha,d}$$

Складову, спрямовану вздовж пояса, сприймає площадка сколювання. Середнє дотичне напруження перевіряють умовою:

$$\tau_d = \frac{N_t}{A_v} \leq f_{v,d}$$

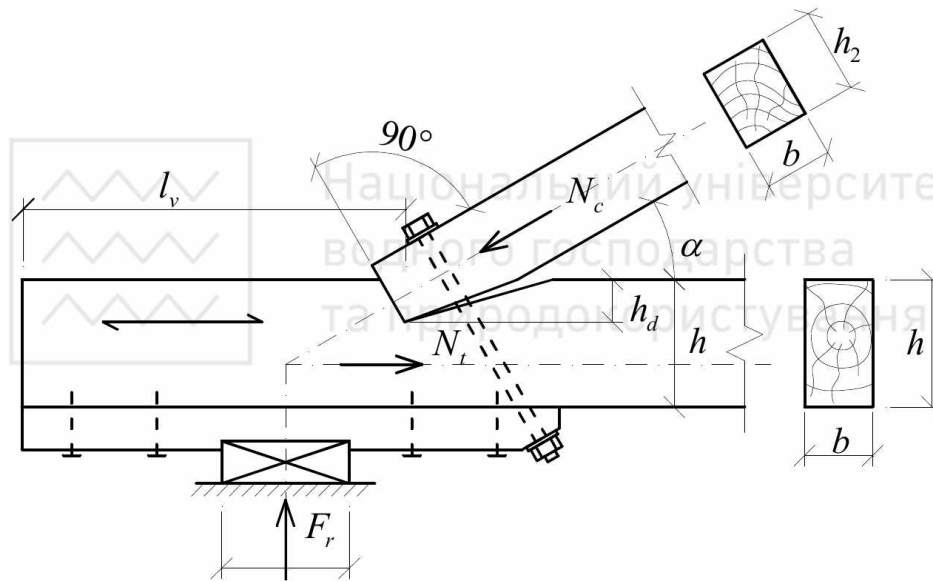


Рисунок 5.1 – Схема опорного вузла ферми на лобовій врубці (джерело: [5], с. 104, рис. 3.1)

Потрібно дотримуватися мінімальної довжини площадки сколювання, обмежувати глибину врубки й забезпечувати достатній залишковий переріз. Болт або хомут у такому вузлі утримує елементи від випадкового розходження, але не замінює перевірки основних контактних поверхонь.

Джерело підрозділу: [5, с. 100–106].

3. Нагельні та болтові з'єднання

Нагель — стержневий елемент, який проходить через з'єднувані деталі та передає зусилля переважно поперек своєї осі. До нагельів належать болти, штирі, цвяхи й шурупи. Робота з'єднання поєднує зминання деревини в отворі та згин нагеля; залежно від товщини деталей і міцності кріплення утворюються різні схеми пластичних шарнірів.

Розрахункову несучу здатність одного зрізу визначають за найменшою з можливих форм руйнування. Загальна несуча здатність групи кріплень не повинна автоматично прийматися як проста сума, якщо нерівномірність розподілу або мала відстань між кріпленнями зменшує ефективну кількість. У спрощеному вигляді перевірка має форму:

$$F_d \leq nF_{v,Rd}$$

Відстані вздовж і поперек волокон, а також до торця й крайки призначають за напрямом сили. Недостатня відстань до навантаженого торця особливо небезпечна через можливе розколювання. Отвори виконують із точністю, яка не допускає значного початкового ковзання.

Джерело підрозділу: [5, с. 105–121].

4. Клейові з'єднання

Клейові з'єднання дають змогу передавати зусилля по площі й одержувати жорсткі елементи без значного ослаблення отворами. Їх застосовують у дощато-клеєних елементах, фанерних панелях, стиках і підсиленнях. Надійність залежить від підготовки поверхні, вологості, тиску пресування, температури та витримування.

Клейовий шов повинен бути тонким і рівномірним. Деревина та клей мають бути сумісними за умовами експлуатації. Для шва, який передає зсув між шарами згинального елемента, використовують перевірку дотичних напружень:

$$\tau_d = \frac{V_d S}{I b_{gl}} \leq f_{v,d}$$

Крихке відривання поперек волокон небезпечніше за рівномірний зсув, тому форму стику й закінчення накладок виконують без різких концентраторів. Якість склеювання контролюють як технологічний процес, а не лише кінцевими розмірами вузла.

Джерело підрозділу: [5, с. 122–123].

5. Складені елементи на податливих в'язях

Якщо окремі бруси з'єднані шпонками, нагельми або іншими податливими в'язями, між ними виникає взаємне ковзання. Через це складений елемент має меншу жорсткість, ніж монолітний переріз тієї самої форми. Розрахунок повинен урахувувати і несучу здатність в'язей, і зниження загальної жорсткості.

Призматичні дерев'яні шпонки працюють на зминання та сколювання. Їхні розміри й відстані призначають так, щоб між сусідніми врізками залишалася достатня довжина деревини. Для зусилля, пов'язаного з можливим розпором, [5] наводить залежність:

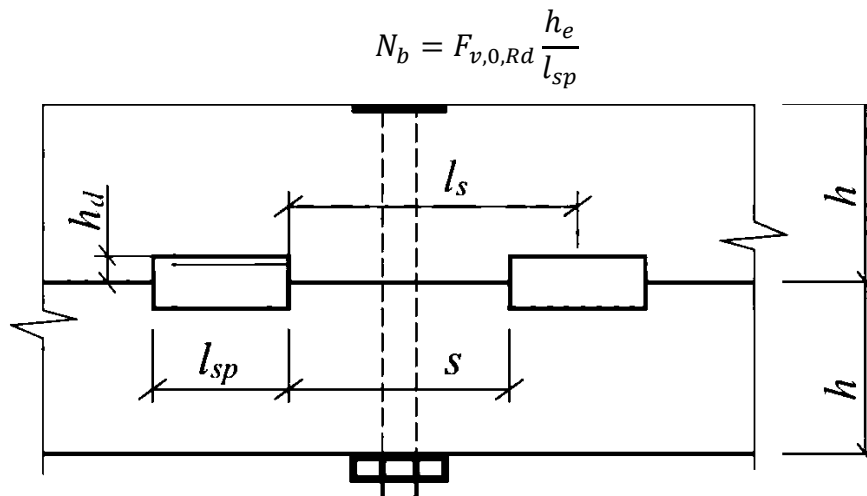


Рисунок 5.2 – З'єднання складеного елемента на дерев'яних призматичних шпонках (джерело: [5], с. 143, рис. 3.8)

На рисунку 5.2 показано довжину шпонки l_{sp} , відстань у просвіті s та глибину врізки h_e . Збільшення глибини понад установлені межі послаблює брус; замала відстань між шпонками може спричинити сколювання проміжної ділянки.

Джерело підрозділу: [5, с. 139–143].

6. Матеріали та конструкції з пластмас

Пластмаси розглядають як окрему групу конструкційних матеріалів із малою густиною та вираженою залежністю властивостей від температури й часу. Тому після вибору матеріалу визначають конструктивну форму, умови експлуатації та відповідні розрахункові характеристики.

6.1. Основні матеріали

У будівельних конструкціях застосовують полімери, склопластики, органічне скло, жорсткі пінопласти та комбіновані матеріали. Пластмаси мають малу густину, корозійну стійкість, технологічність формування й можливість виготовлення світлопрозорих огорожень. Їхні властивості значно залежать від температури, тривалості навантаження та старіння.

Армовані пластмаси поєднують полімерну матрицю з волокнистим наповнювачем. Напрямок армування визначає анізотропію. Пінопласти мають малу густину й добрі теплоізоляційні властивості, але обмежену місцеву міцність; їх часто використовують як середній шар панелей.

6.2. Конструктивні форми

Пластмаси застосовують у хвилястих і плоских листах, оболонках, світлопрозорих покриттях, тришарових панелях та профільованих елементах. Хвиляста форма збільшує жорсткість листа. У тришаровій панелі міцні обшивки сприймають нормальні напруження, а легкий середній шар — зсув і забезпечує спільну роботу.

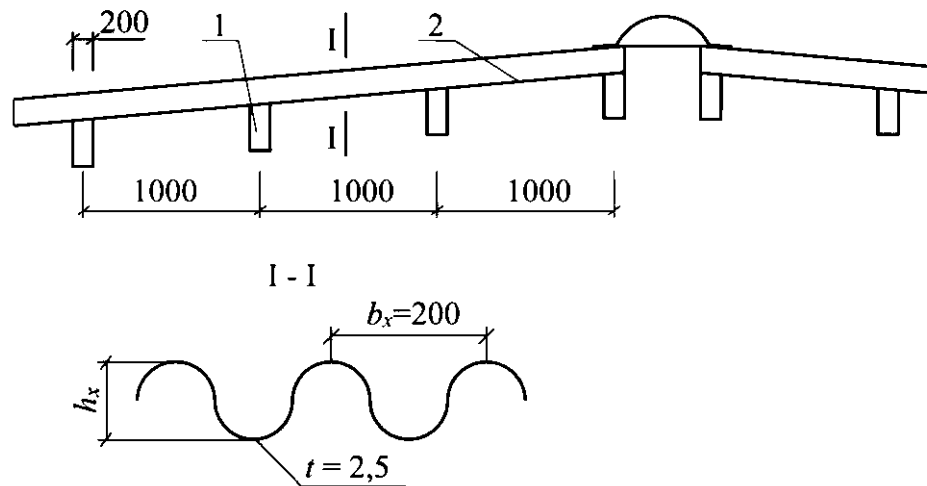


Рисунок 5.3 – Покриття з хвилястого світлопрозорого склопластику (джерело: [5], с. 167, рис. 4.2)

6.3. Основні перевірки

Для листа або панелі визначають навантаження, розрахункову схему, згинальний момент і прогин. Базові умови для згину й жорсткості мають вигляд:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \leq f_{m,d}, \quad w \leq w_{lim}$$

Розрахункові характеристики потрібно приймати для заданої температури й тривалості дії. Окремо перевіряють місцеву стійкість тонких ділянок, міцність отворів і кріплень, герметичність стиків, температурні деформації та довговічність під дією сонячного випромінювання.

Джерело підрозділу: [5, с. 162–169].

7. Послідовність проєктування з'єднання

- визначити зусилля, які вузол передає між елементами;
- вибрати тип з'єднання відповідно до матеріалу, умов виготовлення та експлуатації;
- побудувати розрахункову схему передавання зусиль;

- перевірити кріплення, контактні поверхні, сколювання та ослаблені перерізи;
- призначити мінімальні відстані, товщини й крайові відступи;
- перевірити жорсткість або податливість вузла та її вплив на систему;
- передбачити захист від зволоження, корозії металевих деталей і пожежі;
- оформити креслення з усіма розмірами, матеріалами та вимогами до виготовлення.

Висновки

- тип з'єднання визначає механізм передавання зусиль і перелік перевірок;
- врубки перевіряють за зминанням і сколюванням, нагельні вузли — за роботою деревини та кріплення;
- клейові шви дають жорстке з'єднання, але потребують контрольованої технології;
- податливі в'язі зменшують жорсткість складеного елемента;
- для пластмас обов'язково враховують температуру, тривалість навантаження, місцеву стійкість і старіння.

Контрольні запитання

1. Які вимоги ставлять до з'єднань дерев'яних конструкцій?
2. Які механізми руйнування можливі у лобовій врубці?
3. Як працює нагельне з'єднання?
4. Чому важливі відстані між нагельями та до крайок?
5. Від чого залежить якість клейового шва?
6. Чому складений елемент на податливих в'язях менш жорсткий за монолітний?
7. Які переваги й обмеження мають пластмаси?
8. Які перевірки виконують для хвилястого світлопрозорого листа?

Основні джерела лекції: [5, с. 100–106, 105–123, 139–143, 162–169].

Лекція 6. Матеріали та основи розрахунку сталевих конструкцій

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: сформувати цілісне уявлення про будівельні сталі, їхні механічні властивості, сортамент та логіку перевірки сталевих елементів за граничними станами.

Заняття 1 (2 години). Будівельні сталі, прокат і захист від корозії.

Заняття 2 (2 години). Розрахунковий опір, перевірки розтягу і стиску.

План

1. Сфера застосування, переваги й обмеження сталевих конструкцій.
2. Будівельні сталі: склад, виготовлення та класифікація.
3. Механічні властивості сталі та робота під навантаженням.
4. Сортамент і геометричні характеристики профілів.
5. Розрахункова модель і метод граничних станів.
6. Базові перевірки міцності, жорсткості та стійкості.

Навчальний матеріал

Сталеві конструкції застосовують у каркасах виробничих і громадських будівель, покриттях великих прольотів, баштах, щоглах, резервуарах, естакадах та інших спорудах. Їхня доцільність визначається високою міцністю матеріалу, відносно малою масою елементів, заводською готовністю та можливістю швидкого монтажу. Водночас під час проєктування потрібно враховувати корозію, зниження міцності при нагріванні, небезпеку втрати стійкості тонкостінних елементів і чутливість окремих сталей до крихкого руйнування [4, с. 18–25].

1. Особливості сталевих конструкцій

Найважливіша перевага сталі — поєднання значної несучої здатності з однорідністю та передбачуваністю механічних властивостей. Завдяки цьому розрахункова схема добре відображає фактичну роботу елемента. Сталь придатна до зварювання й болтового з'єднання, а пошкоджені або перевантажені елементи часто можна підсилити додатковими листами, ребрами чи накладками.

До обмежень належать потреба в антикорозійному захисті, вогнезахисті та регулярному огляді. Висока міцність матеріалу дає змогу зменшувати площу перерізу, але водночас збільшує гнучкість елемента. Тому для стиснутих стержнів, балок і тонких пластинок визначальною може бути не міцність сталі, а загальна чи місцева стійкість.

Властивість	Практичне значення
Висока міцність	Менша маса та можливість перекривати значні прольоти.
Пластичність	Перерозподіл напружень і попередження раптового руйнування.
Однорідність	Надійніша відповідність розрахунковій моделі.
Теплопровідність	Швидке прогрівання під час пожежі; потрібен вогнезахист.
Схильність до корозії	Потрібні покриття, водовідведення та доступ для огляду.

2. Будівельні сталі та чинники їхніх властивостей

Будівельна сталь є сплавом заліза з вуглецем та іншими елементами. Зі збільшенням вмісту вуглецю міцність зазвичай зростає, але пластичність і зварюваність погіршуються. Марганець і кремній застосовують для розкислення та підвищення міцності; легувальні добавки дають змогу

поліпшити міцність, холодостійкість або корозійну стійкість. Шкідливі домішки, неоднорідність структури та дефекти прокату можуть знижувати надійність.

Для несучих конструкцій використовують переважно вуглецеві та низьколеговані сталі. Під час вибору враховують характер напруженого стану, температуру експлуатації, динамічність навантаження, товщину прокату, спосіб з'єднання та вимоги до зварюваності. Остаточний клас і розрахункові характеристики приймають за чинними нормами та сертифікатом матеріалу.

3. Механічні властивості сталі

Роботу сталі оцінюють за діаграмою «напруження — деформація». Нормальне напруження в центральній навантаженій стержні та відносну поздовжню деформацію визначають як:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

На початковій ділянці діаграми деформації майже пропорційні напруженням. Коефіцієнтом пропорційності є модуль пружності:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Після досягнення межі текучості пластичні деформації швидко зростають. Межа текучості є основною характеристикою для більшості розрахунків звичайних сталевих елементів, а тимчасовий опір характеризує граничну міцність перед руйнуванням. Відносне видовження після розриву відображає пластичність, ударна в'язкість — здатність чинити опір крихкому руйнуванню.

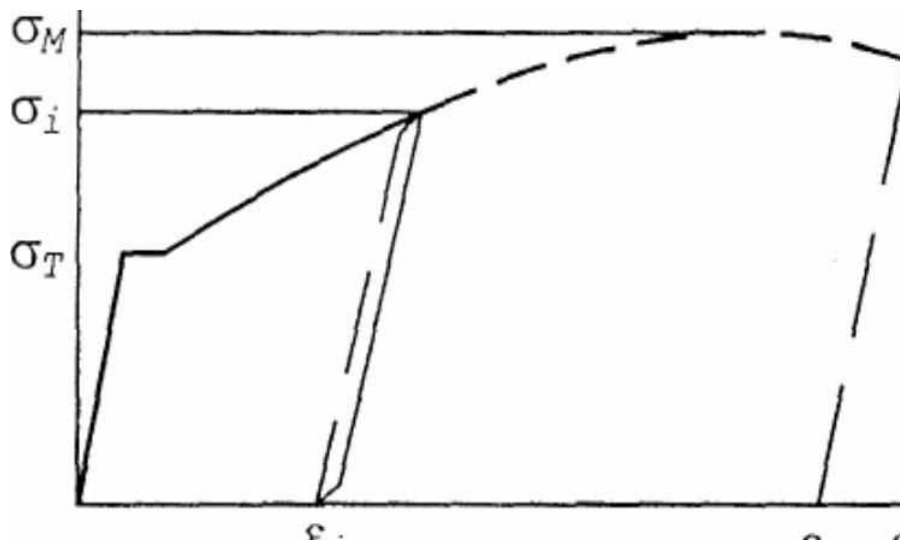


Рисунок 6.1 – Діаграма одnorазового та повторного навантаження сталі (джерело: [4], с. 30, рис. 2.4)

Під повторними навантаженнями, особливо за наявності різких змін перерізу, отворів або дефектів зварних швів, можливе втомне руйнування. Воно розвивається поступово: зароджується тріщина, поширюється при кожному циклі, а залишений переріз руйнується. Тому конструктивна форма має зменшувати концентрацію напружень.

За низьких температур і при ударній дії здатність сталі до пластичного деформування зменшується. Крихке руйнування може статися без помітних попередніх деформацій, тому особливу увагу приділяють якості матеріалу, зварних швів, відсутності гострих надрізів і правильному вибору сталі [4, с. 25–35].

4. Сортамент та геометричні характеристики

Сталеві елементи виготовляють із листового та фасонного прокату: двотаврів, швелерів, кутиків, таврів, круглих і прямокутних труб, круглої та смугової сталі. Прокатні профілі мають стандартизовані розміри. Для складених перерізів окремі листи й профілі об'єднують зварюванням або болтами.

Площу перерізу A використовують для визначення нормальних напружень при центральному розтягу або стиску. Момент інерції I характеризує опір деформуванню при згині; момент опору W — рівень крайніх нормальних напружень; радіус інерції i — схильність стиснутого елемента до втрати стійкості. Під час вибору профілю прагнуть розмістити матеріал подалі від нейтральної осі, не створюючи надто тонких нестійких частин.

5. Розрахункова схема і граничні стани

Розрахунок починають не з формули, а зі створення моделі: визначають опори, вузли, прольоти, напрямки роботи системи, передавання навантажень та можливі переміщення. Просторову конструкцію за потреби розкладають на плоскі системи, але обов'язково забезпечують їхній зв'язок і стійкість у просторі.

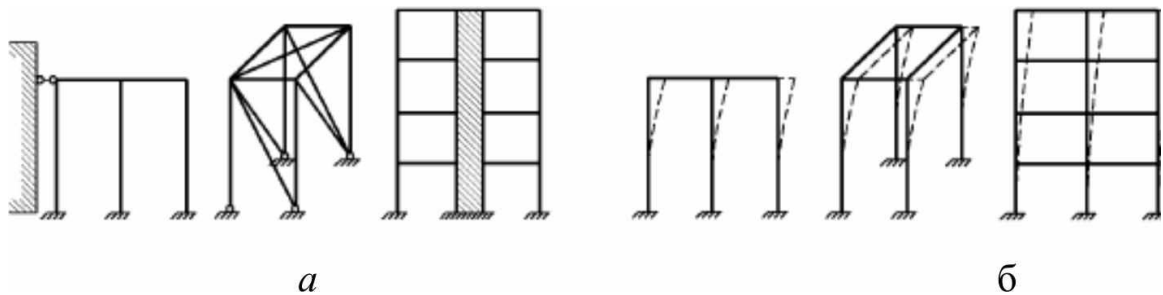


Рисунок 6.2 – Розрахункові моделі плоских і просторових стержневих систем (джерело: [4], с. 39, рис. 3.1)

Граничні стани першої групи охоплюють втрату несучої здатності: руйнування перерізу, втрату загальної або місцевої стійкості, перетворення системи на механізм, втомне чи крихке руйнування. Граничні стани другої групи пов'язані з нормальними умовами експлуатації: надмірними прогинами, переміщеннями, коливаннями або залишковими деформаціями [4, с. 38–45].

Характеристичне навантаження F_k перетворюють на розрахункове множенням на коефіцієнт надійності за навантаженням. Узагальнений запис має вигляд:

$$F_d = \gamma_f F_k$$

Розрахунковий опір сталі отримують із характеристичного опору з урахуванням коефіцієнта надійності за матеріалом:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$$

Коефіцієнт умов роботи γ_c ураховує особливості елемента та умов його експлуатації. Числові значення коефіцієнтів і опорів для реального проєктування беруть із чинних норм; у навчальному розрахунку їх задають у вихідних даних.

6. Базові перевірки сталевих елементів

Для центрально розтягнутого елемента порівнюють напруження за площею нетто з розрахунковим опором сталі. Площа нетто враховує послаблення отворами та вирізами:

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c$$

Для балки, що працює на згин у пружній стадії, базова перевірка нормальних напружень має вигляд:

$$\frac{M}{W_n} \leq R_y \gamma_c$$

Стиснутий стержень перевіряють не лише за міцністю перерізу, а й за стійкістю. Балку, крім міцності, перевіряють за поперечною силою, прогином, загальною стійкістю стиснутого пояса та місцевою стійкістю стінки і полиць. Така послідовність не дає звести розрахунок до однієї формули й відображає реальні форми відмови.

7. Конструктивні заходи довговічності

Довговічність забезпечують поєднанням матеріалу, форми та захисту. У перерізах не повинна затримуватися вода; замкнені порожнини герметизують або вентилують; поверхні роблять доступними для фарбування й огляду. Вогнезахисні облицювання, штукатурки або спучувані покриття сповільнюють нагрівання металу. Якість монтажних і заводських з'єднань контролюють до нанесення покриттів.

Висновки

- Несуча здатність сталеві конструкції залежить не лише від міцності сталі, а й від стійкості елементів та просторової роботи системи.
- Розрахунок починають із розрахункової схеми, після чого визначають зусилля і перевіряють усі можливі граничні стани.
- Сортамент і форма перерізу мають забезпечувати ефективне використання матеріалу, технологічність виготовлення та довговічність.

Контрольні запитання

1. Які переваги та обмеження мають сталеві конструкції?
2. Чому зі збільшенням міцності сталі не завжди можна пропорційно зменшити переріз?
3. Які характеристики читають із діаграми «напруження — деформація»?
4. Чим відрізняються межа текучості й тимчасовий опір?
5. Для чого потрібні площа, момент інерції, момент опору і радіус інерції?
6. Які явища належать до граничних станів першої та другої груп?
7. Чим відрізняються характеристичне навантаження і розрахункове навантаження?
8. Які додаткові перевірки потрібні для балки та стиснутого стержня?

Основне джерело лекції: [4, с. 18–35, 38–45, 67–79]. Для обов'язкового опрацювання: с. 18–25, 31–35, 38–45.

Лекція 7. Зварні та болтові з'єднання сталевих конструкцій

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: засвоїти види зварних і болтових з'єднань, шляхи передавання зусиль, основні розрахункові перевірки та конструктивні вимоги до вузлів.

План

1. Призначення і класифікація з'єднань.
2. Зварні шви та типи зварних з'єднань.
3. Робота й базові перевірки зварних швів.
4. Види болтів і способи передавання зусиль.
5. Розрахунок болтового з'єднання.
6. Конструктивне розміщення болтів і вибір типу з'єднання.

Навчальний матеріал

З'єднання формують вузол і передають зусилля між окремими елементами. Від їхньої форми залежить не лише міцність стику, а й загальна розрахункова схема: шарнірний або жорсткий вузол, можливість повороту, поява ексцентриситетів і концентрації напружень. Основними для сучасних сталевих конструкцій є зварні та болтові з'єднання [4, с. 87–88, 99–106, 119–127].

1. Загальні вимоги до з'єднань

З'єднання повинно безпечно передати розрахункове зусилля, бути технологічним у виготовленні та монтажі, допускати контроль якості й не створювати зайвих концентраторів напружень. Вузол проєктують так, щоб лінії дії сил проходили якомога ближче до центрів тяжіння з'єднаних елементів. Ексцентриситет викликає додатковий момент, який потрібно врахувати.

Заводські з'єднання переважно виконують зварними, оскільки в контрольованих умовах можна забезпечити якість шва. Монтажні стики часто виконують болтовими: це пришвидшує складання, зменшує залежність від погоди та полегшує контроль. Остаточний вибір залежить від навантаження, товщини деталей, доступу до вузла, точності виготовлення й вимог до ремонтпридатності.

2. Зварні з'єднання

Зварювання утворює нерознімне з'єднання завдяки місцевому нагріванню кромek і, за потреби, додаванню присадного металу. У будівельних конструкціях застосовують стикові та кутові шви. Стиковий шов сполучає елементи в одній площині; кутовий шов передає зусилля в напускних, таврових і кутових з'єднаннях.

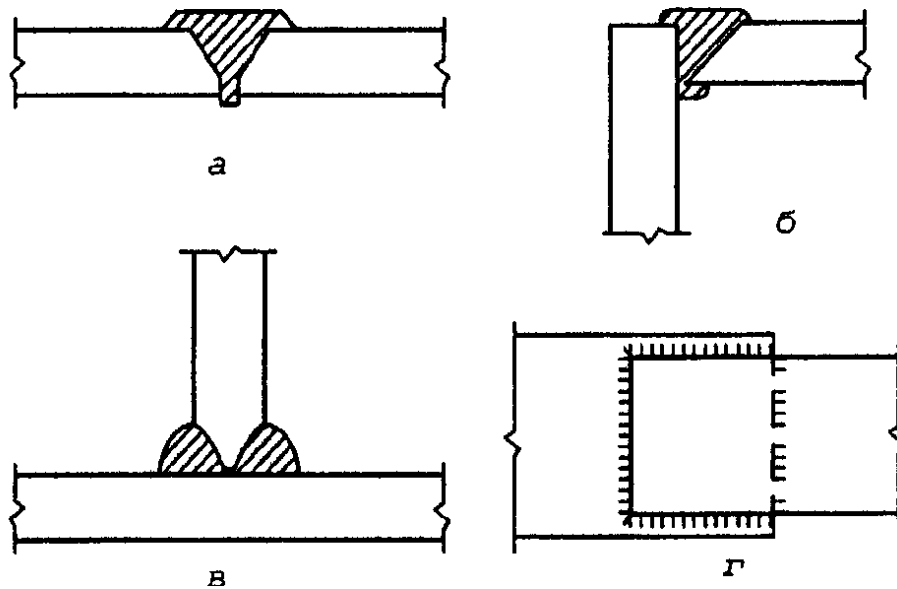


Рисунок 7.1 – Основні види зварних з'єднань: стикове, кутове, таврове та внапуск (джерело: [4], с. 105, рис. 5.13)

Робочими параметрами кутового шва є катет k_f і розрахункова довжина l_w . Початок і кінець шва можуть мати нижчу якість, тому ефективну довжину приймають меншою за геометричну. Для стикового шва враховують товщину тоншого з'єднуваного елемента. Переривчасті шви застосовують лише там, де це допустимо умовами роботи й захистом від корозії.

3. Робота та перевірка зварних швів

Якісно виконаний стиковий шов із повним проваром передає нормальні та дотичні напруження через площу проплавлення. Для центрального розтягу або стиску базова перевірка має вигляд:

$$\sigma_w = \frac{N}{t l_w} \leq R_{wy} \gamma_c$$

Кутовий шов умовно перевіряють за небезпечним перерізом у металі шва або по межі сплавлення. Для простого центрального навантаження навчальний запис перевірки можна подати так:

$$\tau_w = \frac{N}{\beta_f k_f l_w} \leq R_{wf} \gamma_c$$

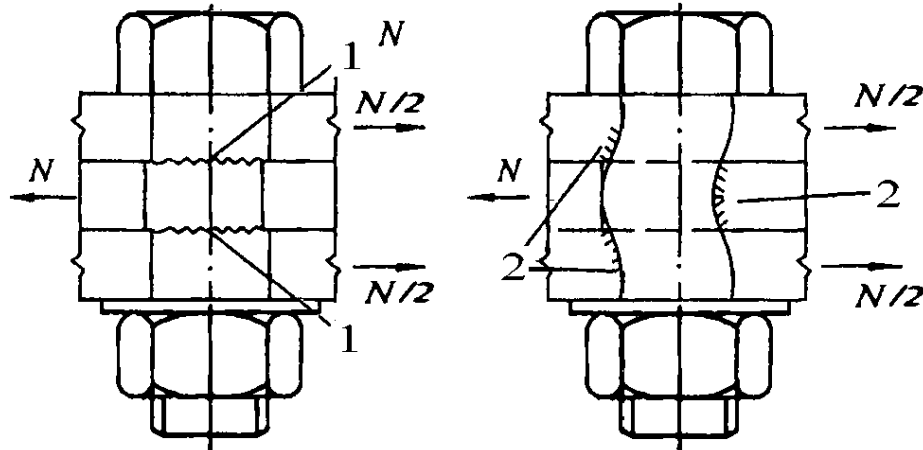
У реальному вузлі зусилля часто розподіляється між кількома ділянками шва нерівномірно. Якщо сила прикладена ексцентрично, до прямого зсуву додається дія моменту. Розрахунок повинен охоплювати кожний небезпечний напрям, а шви — утворювати зрозумілий шлях передавання зусиль.

Типові дефекти — непровар, пори, шлакові включення, подрізи, тріщини та неправильна форма шва. Якість перевіряють візуально й вимірювально, а відповідальні шви — також фізичними методами. Дефект не можна компенсувати довільним збільшенням катета: надмірний об'єм наплавленого металу збільшує теплові деформації та залишкові напруження.

4. Болтові з'єднання

Болтове з'єднання є рознімним і складається з болта, гайки, шайб та з'єднуваних деталей. За способом роботи розрізняють з'єднання, у яких сила передається зрізом стержня і зминанням

стілки отвору, та фрикційні з'єднання на високоміцних болтах, де зсуву перешкоджає тертя між стягнутими поверхнями. Болт також може працювати на осьовий розтяг.



б

Рисунок 7.2 – Робота болтового з'єднання при зсуві: зріз болта і зминання стінки отвору (джерело: [4], с. 126, рис. 6.6)

У з'єднанні на звичайних болтах після вибору зазорів стержень болта спирається на стінку отвору. Граничну силу для одного болта визначає найменша з можливих несучих здатностей: за зрізом болта, зминанням з'єднуваного металу, розтягом болта або блоковим руйнуванням деталі.

5. Базові розрахункові перевірки болтів

Несучу здатність одного болта за зрізом у спрощеному вигляді визначають:

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_c$$

де A_b — розрахункова площа перерізу болта; n_s — кількість площин зрізу; R_{bs} — розрахунковий опір болта зрізу. Перевірка за зминанням металу біля отвору має узагальнений вигляд:

$$N_{bp} = R_{bp} d t \gamma_c$$

де d — діаметр стержня або розрахунковий діаметр отвору за прийнятою методикою; t — найменша сумарна товщина деталей, що зминаються в одному напрямі. Потрібну кількість болтів попередньо визначають:

$$n \geq \frac{N}{N_b}$$

Результат округлюють у більшу сторону, після чого перевіряють розміщення групи, розподіл зусиль і послаблення основного елемента отворами. Перевірка перерізу нетто має вигляд:

$$\frac{N}{A_{net}} \leq R_y \gamma_c$$

Якщо група болтів навантажена моментом, крайні болти отримують більші зусилля. Для фрикційного з'єднання несучу здатність визначають за силою тертя, яка залежить від натягу високоміцних болтів, кількості поверхонь тертя та підготовки контактних поверхонь.

6. Розміщення болтів і конструктивні вимоги

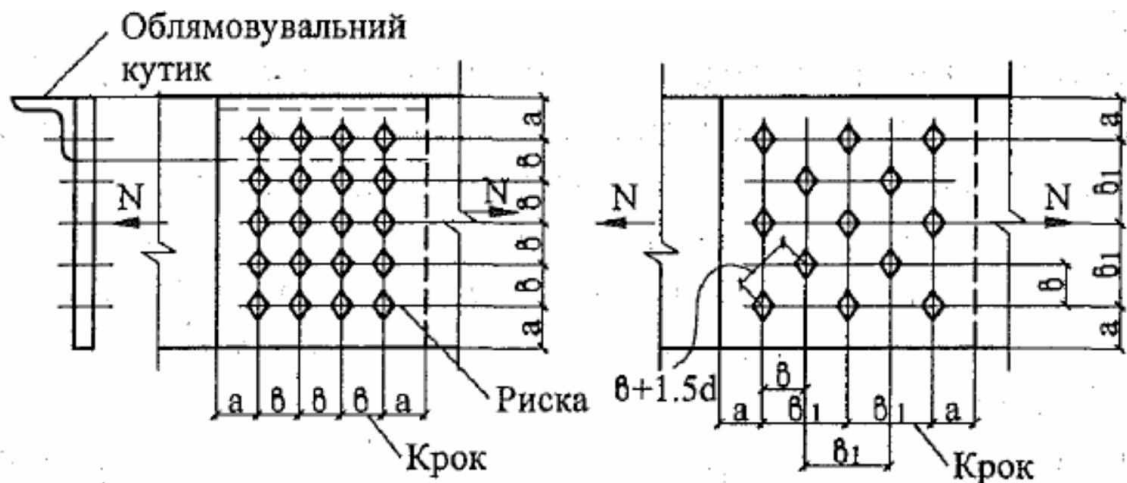


Рисунок 7.3 – Рядове та шахове розміщення болтів у з'єднанні (джерело: [4], с. 136, рис. 6.9)

Осі болтів розміщують по рисках. Відстані між болтами та від осі болта до краю деталі обмежують з двох причин: замалі відстані можуть спричинити виколювання або розрив металу, а надто великі — втрату щільності пакета і корозію між деталями. Числові мінімальні та максимальні відстані приймають за чинними нормами й сортаментом профілів.

Критерій	Що потрібно перевірити
Шов	Тип, катет або товщина, ефективна довжина, доступ для виконання і контролю.
Болт	Клас міцності, діаметр, зріз, зминання, розтяг, затягування.
Деталь	Переріз нетто, виколювання, місцеве зминання, ексцентриситет.
Вузол	Реальний шлях зусилля, жорсткість, монтажність, захист від корозії.

7. Вибір типу з'єднання

Зварне з'єднання компактне, не потребує отворів і добре підходить для заводського виготовлення. Болтове з'єднання зручне для монтажу, допускає розбирання та простіше контролюється в польових умовах. Для змінних і динамічних навантажень особливо важливі плавний силовий потік, відсутність гострих переходів та належна якість виконання. Вузол оцінюють як єдину систему, а не як набір окремих швів і болтів.

Висновки

- З'єднання повинно мати чіткий шлях передавання зусилля і не створювати неврахованих ексцентриситетів.
- Зварні шви перевіряють за небезпечними перерізами, а болтові з'єднання — щонайменше за зрізом, зминанням і послабленням деталей.
- Конструктивні відстані, технологія виконання та контроль якості є складовими несучої здатності вузла.

Контрольні запитання

1. Які вимоги ставлять до з'єднань сталевих конструкцій?
2. Чим відрізняються стикові й кутові шви?
3. Які параметри визначають несучу здатність кутового шва?
4. Які дефекти зварного шва є найнебезпечнішими?
5. Як передається зусилля у звичайному болтовому з'єднанні?

6. Чим відрізняється фрикційне з'єднання на високоміцних болтах?
7. Які перевірки виконують для одного болта і для з'єднуваної деталі?
8. Навіщо обмежують відстані між болтами та до краю деталі?

Основне джерело лекції: [4, с. 87–88, 99–106, 119–127, 135–136]. Для обов'язкового опрацювання: с. 99–106, 119–127.

Лекція 8. Сталеві балки, колони та ферми

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: систематизувати призначення, конструктивні форми, роботу та основні перевірки сталевих балок, колон і ферм.

Заняття 1 (2 години). Сталеві балки і балкові клітки.

Заняття 2 (2 години). Сталеві колони, ферми й робота їхніх стержнів.

План

1. Балки та балкові клітки.
2. Робота і перевірки сталевих балок.
3. Типи та робота сталевих колон.
4. Розрахункова довжина, гнучкість і стійкість колон.
5. Типи та компонування сталевих ферм.
6. Розрахункова схема ферми і робота її стержнів.

Навчальний матеріал

Балка, колона і ферма виконують різні функції у несучій системі. Балка передає поперечне навантаження переважно згином, колона передає поздовжню стискальну силу, а ферма сприймає навантаження системою стержнів, які в ідеалізованій схемі працюють на розтяг або стиск. Розуміння шляху навантаження дає змогу правильно обрати переріз і перелік перевірок [4, с. 139–149, 181–187, 211–219].

1. Сталеві балки та балкові клітки

Балками перекривають прольоти між опорами. За виготовленням вони бувають прокатними та складеними. Прокатна балка проста й економічна для малих і середніх зусиль. Складену двотаврову балку утворюють зі стінки та поясів, добираючи їхні розміри відповідно до згинального моменту, поперечної сили й вимог стійкості.

Система взаємно перпендикулярних балок утворює балкову клітку. У спрощеній клітці настил спирається безпосередньо на головні балки; у нормальній між настилом і головними балками є балки настилу; в ускладненій додають допоміжні балки. Кожний рівень передає навантаження наступному, аж до колон і фундаментів.

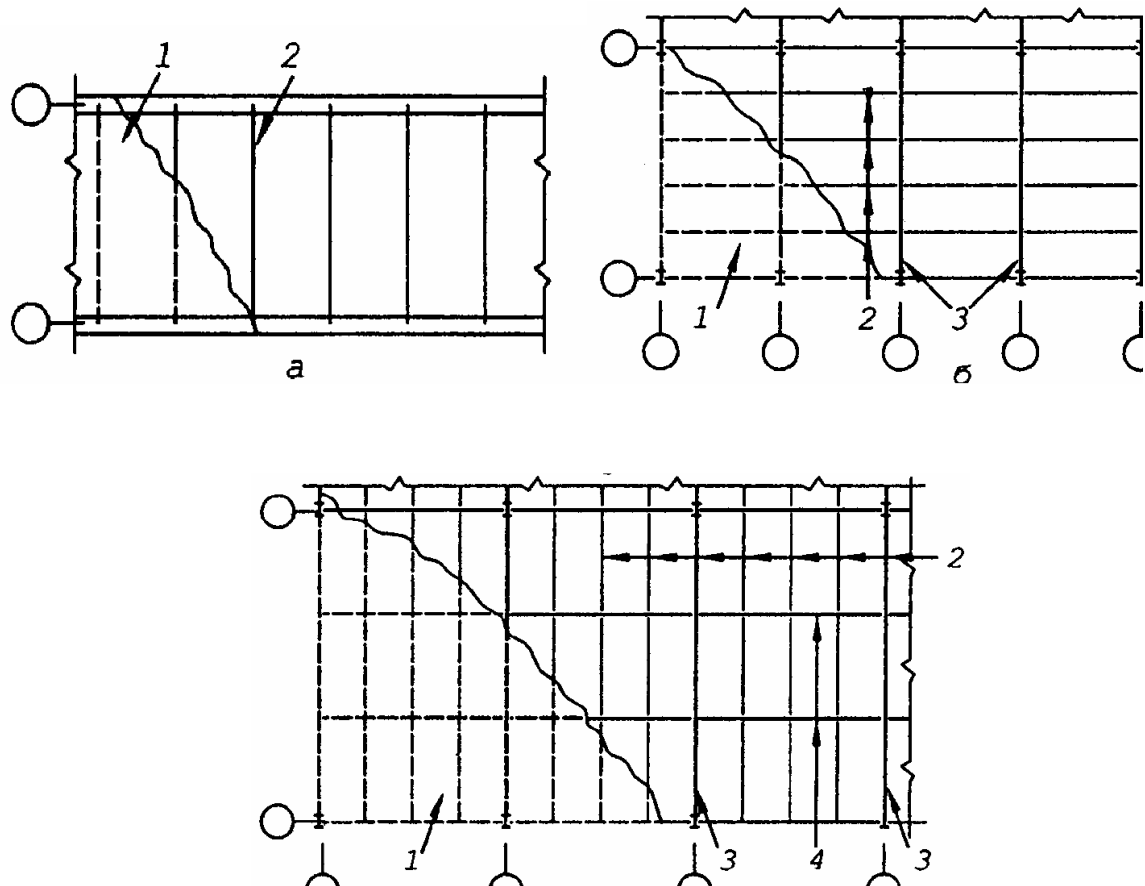


Рисунок 8.1 – Схеми балкових кліток: спрощена, нормальна та ускладнена (джерело: [4], с. 145, рис. 7.3)

2. Розрахункова робота балки

На першому етапі збирають навантаження на вантажну площу балки й перетворюють його на погонне. Далі будують епюри поперечних сил Q і згинальних моментів M . За максимальним моментом добирають момент опору, за поперечною силою перевіряють стінку, а за умовами експлуатації — прогин.

Перевірка нормальних напружень при пружному згині має вигляд:

$$\sigma = \frac{M}{W_n} \leq R_y \gamma_c$$

Дотичні напруження у стінці балки оцінюють за формулою Журавського:

$$\tau = \frac{QS}{It_w} \leq R_s \gamma_c$$

де S — статичний момент частини перерізу відносно нейтральної осі; t_w — товщина стінки. Для експлуатаційної придатності фактичний прогин порівнюють із граничним:

$$f \leq f_{lim}$$

Крім міцності й прогину, перевіряють загальну стійкість балки: стиснутий пояс може відхилитися вбік і повернути переріз. Суцільний настил, надійно прикріплений до пояса, або спеціальні зв'язки закріплюють балку. Тонка стінка може втрачати місцеву стійкість між поясами чи ребрами; тоді передбачають поперечні ребра жорсткості або змінюють її товщину.

Етап перевірки балки	Мета
Міцність при згині	Не допустити перевищення нормальних напружень у поясах.
Зсув	Перевірити дотичні напруження переважно у стінці.

Етап перевірки балки	Мета
Прогин	Забезпечити нормальну експлуатацію настилу й обладнання.
Загальна стійкість	Не допустити бокового випинання стиснутого пояса.
Місцева стійкість	Не допустити випинання стінки або полиць.

3. Сталеві колони

Колона передає навантаження від балок, ферм або перекриттів до фундаменту. Вона складається зі стержня, оголовка, через який прикладається навантаження, та бази, яка розподіляє зусилля на фундамент. За перерізом колони поділяють на суцільні та наскрізні. Суцільні перерізи утворюють прокатними або зварними двотаврами, трубами та коробами; наскрізні — кількома гілками, з'єднаними планками або ґратами.

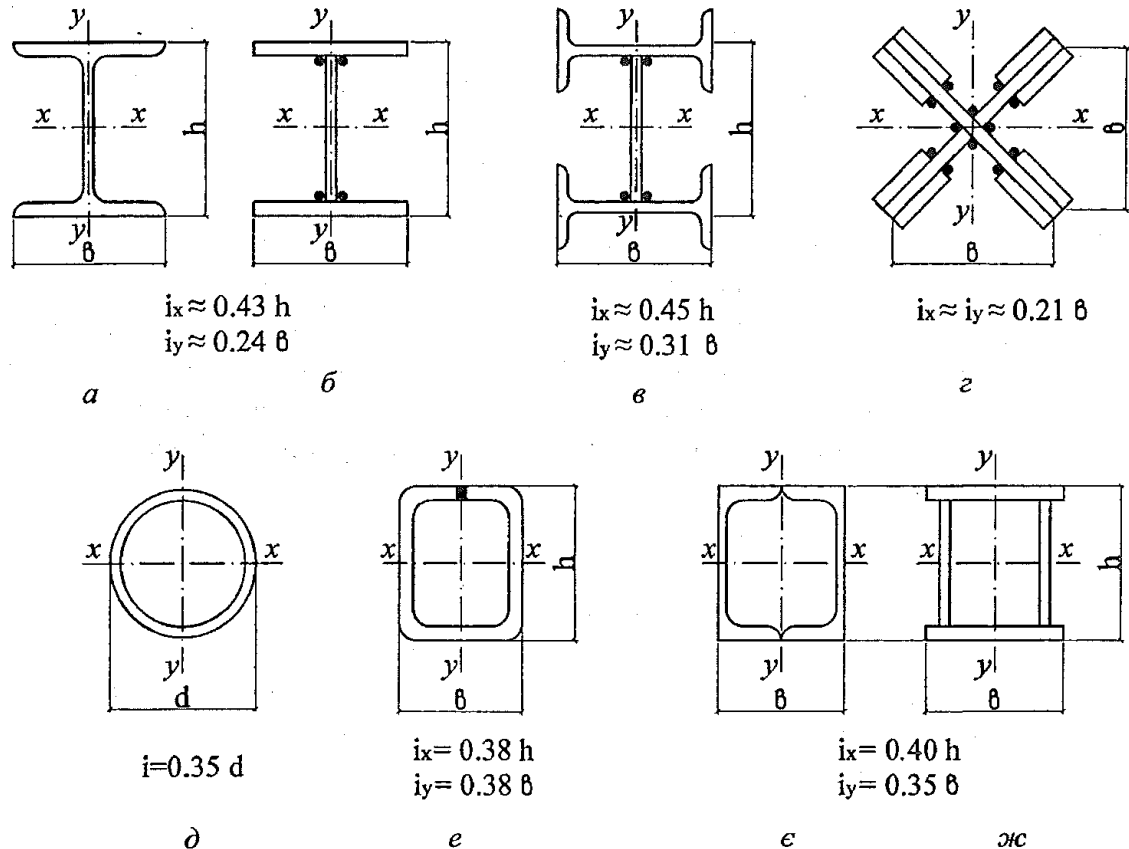


Рисунок 8.2 – Типи перерізів суцільних сталевих колон (джерело: [4], с. 183, рис. 8.3)

Переріз прагнуть зробити рівностійким, тобто наблизити гнучкості відносно головних осей. Замкнені коробчасті й трубчасті перерізи ефективні за стійкістю, але потребують продуманого захисту внутрішніх поверхонь. Відкриті перерізи простіше зварювати й оглядати.

4. Розрахункова довжина, гнучкість і стійкість

Центрально стиснутий короткий стержень міг би вичерпати міцність матеріалу. Довгий стержень зазвичай раніше втрачає стійкість і викривлюється. Розрахункова довжина залежить від геометричної довжини та умов закріплення кінців:

$$l_{ef} = \mu l$$

Гнучкість стержня відносно певної осі визначають через радіус інерції перерізу:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}$$

Чим більша гнучкість, тим сильніше знижується несуча здатність при стиску. Узагальнена перевірка стійкості центрально стиснутого елемента має вигляд:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq R_y \gamma_c$$

Коефіцієнт φ залежить від гнучкості, форми перерізу, початкових недосконалостей і властивостей сталі. Для позacentрово стиснутої колони додатково враховують згинальний момент. Зв'язки каркаса скорочують вільну довжину та забезпечують стійкість колони з площини рами.

5. Сталеві ферми

Ферма складається з верхнього і нижнього поясів та грат — розкосів і стояків. Висота, обриси поясів і крок вузлів визначають розподіл зусиль, масу, габарити транспортування та зручність спирання покриття. Балкові ферми можуть бути розрізними або нерозрізними; аркові й рамні форми доцільні для великих прольотів; консольні та комбіновані системи застосовують за спеціальних умов.

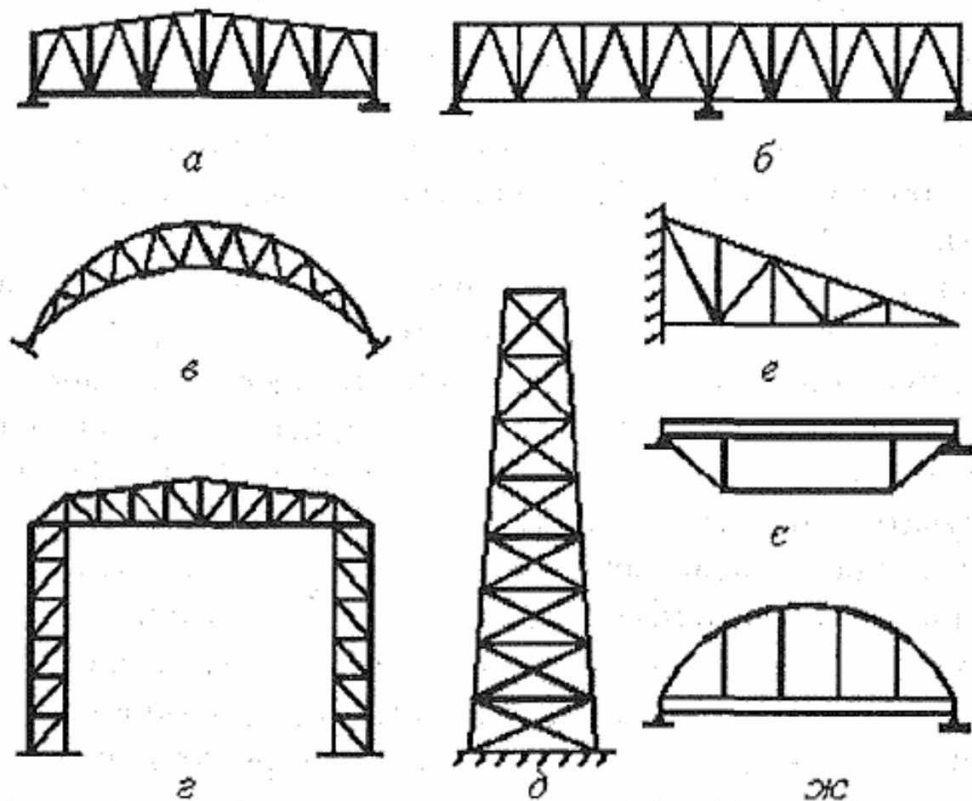


Рисунок 8.3 – Основні типи сталевих ферм (джерело: [4], с. 212, рис. 9.1)

У розрахунковій моделі вузли ідеалізують шарнірними, а навантаження прикладають у вузлах. Тоді стержні працюють переважно на поздовжню силу. Якщо навантаження діє між вузлами або вузол має значну жорсткість, у стержнях з'являються додаткові згинальні моменти.

6. Розрахунок і конструювання стержнів ферми

Після визначення поздовжніх сил розтягнуті стержні перевіряють за площею нетто:

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c$$

Стиснуті стержні перевіряють за стійкістю так само, як колони, але їхня розрахункова довжина залежить від положення у фермі та закріплення в площині й з площини. Верхній

стиснутий пояс потребує розкріплення прогонами або зв'язками. Вузлові фасонки та з'єднання повинні передати сили без значного ексцентриситету.

Просторова стійкість покриття забезпечується системою горизонтальних і вертикальних зв'язків. Вони сприймають вітрові та монтажні впливи, фіксують стиснуті пояси й передають поздовжні сили до стійких рам або зв'язкових блоків. Без зв'язків окремі правильно розраховані ферми не утворюють надійної просторової системи.

7. Послідовність вибору конструктивної форми

1. Визначити проліт, сітку колон, тип настилу та шлях передавання навантаження.
2. Обрати конструктивну систему: балка, балкова клітка або ферма.
3. Призначити розрахункову схему, опори та просторові зв'язки.
4. Визначити внутрішні зусилля і попередньо підібрати перерізи.
5. Перевірити міцність, жорсткість, загальну та місцеву стійкість.
6. Сконструювати вузли, стики, оголовки, бази та елементи розкріплення.

Висновки

- Балка працює переважно на згин, колона — на стиск зі стійкістю, ферма — системою осевих сил у стержнях.
- Для кожного елемента міцність є лише однією з перевірок; обов'язковими є жорсткість і різні форми стійкості.
- Просторові зв'язки об'єднують окремі елементи в єдину несучу систему.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються прокатні та складені балки?
2. Які типи балкових кліток застосовують?
3. Які перевірки потрібно виконати для сталевих балки?
4. Чим відрізняються суцільні й наскрізні колони?
5. Що таке розрахункова довжина та гнучкість стержня?
6. Чому стиснутий стержень може втратити стійкість до вичерпання міцності сталі?
7. Які елементи утворюють ферму?
8. Чому навантаження на ферму бажано прикладати у вузлах?
9. Яку роль виконують просторові зв'язки покриття?

Основне джерело лекції: [4, с. 139–149, 181–187, 211–219]. Для обов'язкового опрацювання: с. 139–145, 181–187, 211–219.

Лекція 9. Загальні відомості про кам'яні та армокам'яні конструкції

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: розкрити склад, конструктивні форми, характер роботи під навантаженням і основи армування кам'яної кладки.

План

1. Сфера застосування кам'яних конструкцій.
2. Камені, цегла, блоки та розчини.
3. Види кладки й роль перев'язки швів.
4. Робота кладки при стиску та інших силових впливах.
5. Основи розрахункової перевірки.
6. Армокам'яні конструкції та конструктивні вимоги.

Навчальний матеріал

Кам'яна конструкція утворюється з окремих природних або штучних каменів, з'єднаних розчином у кладку. Вона ефективно працює на стиск, має вогнестійкість, довговічність і значну теплоємність, але характеризується малою міцністю на розтяг і чутливістю до нерівномірних деформацій основи. Армування застосовують для підвищення несучої здатності та зв'язності кладки [3, с. 108–114].

1. Матеріали кам'яних конструкцій

До природних каменів належать вапняк, пісковик, граніт, туф та інші породи. Штучні камені — це керамічна й силікатна цегла, керамічні камені, бетонні та легкобетонні блоки. Вироби можуть бути суцільними або порожнистими. Порожнини зменшують масу й теплопровідність, але змінюють напрям роботи та вимоги до опирання.



Рисунок 9.1 – Цегла та камені різних видів (джерело: [3], с. 108, рис. 12.1)

Основними характеристиками каменю є міцність, морозостійкість, водостійкість, густина, точність форми та стан поверхні. Вибір виробу пов'язують із призначенням стіни, вологісним і температурним режимом, навантаженням та способом оздоблення. Для несучої кладки не можна оцінювати блок лише за його середньою густиною або зовнішнім виглядом.

2. Будівельний розчин

Розчин вирівнює контактні поверхні, зв'язує камені та передає стискальні зусилля. Він повинен мати достатню міцність після тверднення і водночас бути рухливим та водоутримувальним під час укладання. Надто жорсткий розчин погано заповнює нерівності, а надто рухливий може витікати зі шва або спричинити нерівномірне осідання кладки.

Міцність кладки не дорівнює сумі міцностей каменю й розчину. Вона залежить від товщини й заповнення швів, геометричної точності каменів, перев'язки, віку розчину, якості виконання та умов тверднення. Тому розрахунковий опір кладки встановлюють для системи «камінь — розчин».

3. Види кладки та перев'язка

Горизонтальні шви передають вертикальне навантаження, а вертикальні розділяють сусідні камені. Перев'язка не допускає утворення суцільних вертикальних швів і забезпечує сумісну роботу рядів. Стіна повинна бути зв'язана по товщині та довжині; у місцях перетину, примикання і біля прорізів особливо важливі правильне розташування каменів і закладних зв'язків.

Кладку поділяють за матеріалом і способом виконання: цегляну, дрібноблокову, великоблокову, бутову, полегшену тощо. Вибір визначає товщину швів, правила перев'язки, допустиму висоту ярусу, потребу в армуванні та технологію контролю.

4. Робота кам'яної кладки під навантаженням

Навіть при центральному стиску напруження у камені розподіляються нерівномірно через нерівності постелей і різну деформативність каменю та розчину. Розчин прагне розширитися поперечно і створює в камені місцеві розтягувальні напруження. Перші тріщини часто виникають уздовж вертикальних швів або проходять через кілька рядів.

При позацентровому стиску одна частина перерізу навантажена більше, а інша може частково розвантажуватися. Згин, розтяг і зсув для неармованої кладки є небезпечнішими, ніж стиск. Місцеве навантаження під балками або перемичками потребує достатньої площі опирання і, за необхідності, розподільної подушки.

5. Основи розрахункової перевірки

Для центрально стиснутого короткого елемента навчальну перевірку можна подати через середнє напруження:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R_d$$

Розрахунковий опір кладки пов'язаний із характеристичним опором та коефіцієнтом надійності за матеріалом:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m}$$

Для стіни або простінка додатково враховують гнучкість, тривалість навантаження, площу перерізу, отвори, місцеві послаблення та випадковий ексцентриситет. Якщо на переріз діють поздовжня сила N і момент M , початковий ексцентриситет визначають:

$$e_0 = \frac{M}{N}$$

Чим більший ексцентриситет, тим нерівномірніше стискається переріз і тим меншою є його несуча здатність. Точну методику та числові коефіцієнти приймають за чинними нормами; наведені співвідношення пояснюють фізичний зміст перевірки.

6. Армокам'яні конструкції

Поперечне сітчасте армування укладають у горизонтальні шви. Сітки стримують поперечні деформації кладки й підвищують її опір стиску. Поздовжнє армування сприймає розтягувальні зусилля, збільшує зв'язність стін і застосовується у простінках, стовпах, ділянках з великим ексцентриситетом або підвищеними вимогами до тріщиностійкості.

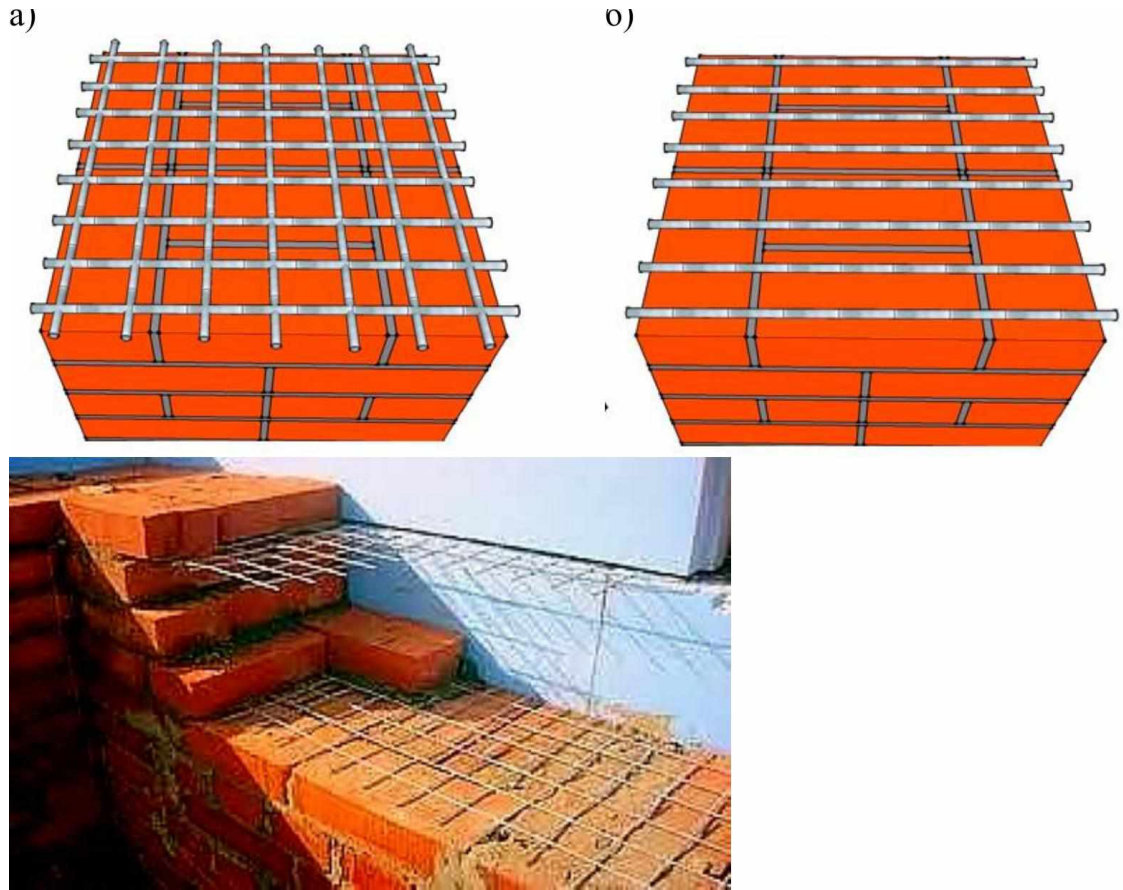


Рисунок 9.2 – Види армування кам'яної кладки: сітками та окремими стержнями (джерело: [3], с. 112, рис. 12.4)

Кількість арматури характеризують відсотком армування. Для пояснення його змісту використовують відношення об'єму сталі до відповідного об'єму кладки:

$$\mu_s = \frac{V_s}{V_m} \cdot 100\%$$

Арматура має бути повністю вкрита розчином і захищена від корозії. Надмірний діаметр стержнів збільшує товщину шва та може послабити кладку, тому тип, діаметр, крок і кількість сіток призначають за розрахунком і конструктивними вимогами.

7. Конструктивна надійність і довговічність

- забезпечують перев'язку швів і просторовий зв'язок стін з перекриттями;
- передбачають достатню довжину опирання балок, плит і перемичок;
- уникають різких змін жорсткості та концентрованого навантаження без розподілу;

- захищають кладку від замочування, промерзання і корозії арматури;
- контролюють вертикальність, товщину та заповнення швів під час виконання робіт.

Висновки

- Кладка є неоднорідним матеріалом, робота якого визначається властивостями каменю, розчину та якістю їхньої спільної роботи.
- Найсприятливішим для кладки є стиск; розтяг, згин, зсув і нерівномірні деформації потребують особливої уваги.
- Армування підвищує несучу здатність і зв'язність, але не замінює правильної перев'язки та якісного виконання швів.

Контрольні запитання

1. З яких матеріалів складається кам'яна кладка?
2. Які властивості каменів визначають сферу їх застосування?
3. Яку роль виконує будівельний розчин?
4. Для чого потрібна перев'язка вертикальних швів?
5. Чому кладка при стиску зазнає місцевого розтягу?
6. Як впливає ексцентриситет на роботу простінки?
7. Чим відрізняються поперечне та поздовжнє армування?
8. Які конструктивні заходи забезпечують довговічність кладки?

Основне джерело лекції: [3, с. 108–114]. Увесь обов'язковий обсяг становить 7 сторінок.

Лекція 10. Бетон і його фізико-механічні властивості

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: пояснити структуру бетону, його міцність, деформативність і тривалі властивості як основу подальшого вивчення залізобетонних конструкцій.

Заняття 1 (2 години). Склад, структура, класи та міцність бетону.

Заняття 2 (2 години). Модуль деформації, усадка і повзучість бетону.

План

1. Склад, структура та класифікація бетону.
2. Міцність бетону при стиску.
3. Міцність при розтягу та інших видах напруженого стану.
4. Фактори, що впливають на міцність.
5. Класи бетону та статистична мінливість.
6. Деформації, модуль пружності, усадка і повзучість.
7. Довговічність бетону.

Навчальний матеріал

Бетон — штучний каменеподібний матеріал, утворений після тверднення суміші в'язучого, води, дрібного й крупного заповнювачів. За потреби вводять мінеральні та хімічні добавки. Бетон добре працює на стиск, але має значно менший опір розтягу; ця особливість є причиною спільного застосування бетону та сталевих арматур [3, с. 17–30].

1. Структура і класифікація бетону

Структура бетону неоднорідна: цементний камінь, зерна заповнювача, контактні зони, пори й мікротріщини мають різні жорсткість та міцність. Під навантаженням деформації розподіляються нерівномірно, тому тріщиноутворення починається локально ще до повного руйнування зразка.

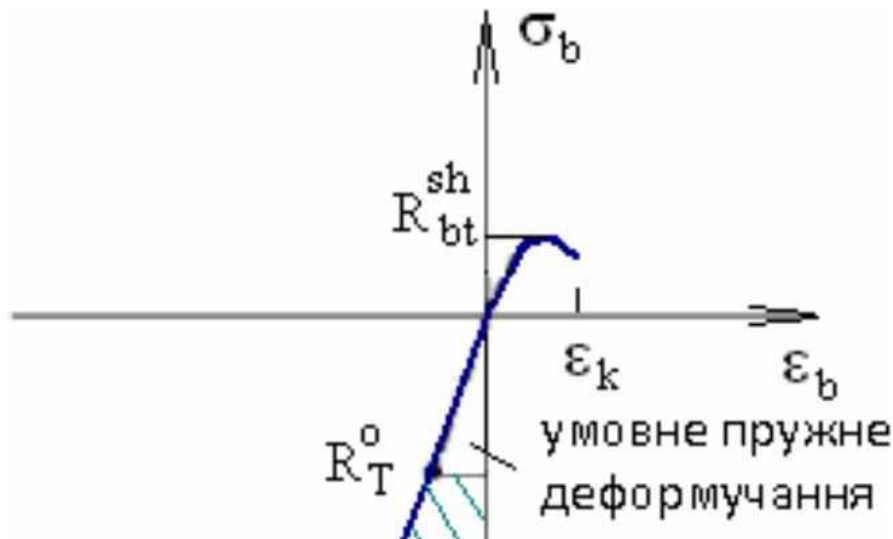


Рисунок 10.1 – Стадії мікротріщиноутворення в бетоні під навантаженням (джерело: [3], с. 19, рис. 2.1)

Бетони класифікують за середньою густиною, видом в'язучого, структурою, видом заповнювача та призначенням. Для несучих конструкцій основними є важкі й легкі конструкційні бетони. Спеціальні бетони можуть мати підвищену водонепроникність, морозостійкість, жаростійкість або хімічну стійкість.

Водоцементне відношення істотно впливає на пористість цементного каменю. Води має бути достатньо для гідратації та укладання суміші, але її надлишок після випаровування утворює капілярні пори й знижує міцність. Тому потрібну рухливість доцільно забезпечувати правильним доборою складу та добавками, а не безконтрольним доливанням води.

2. Міцність бетону при стиску

Міцність визначають випробуванням стандартних зразків. Тимчасовий опір обчислюють як відношення руйнівної сили F до початкової площі навантаження A :

$$R = \frac{F}{A}$$

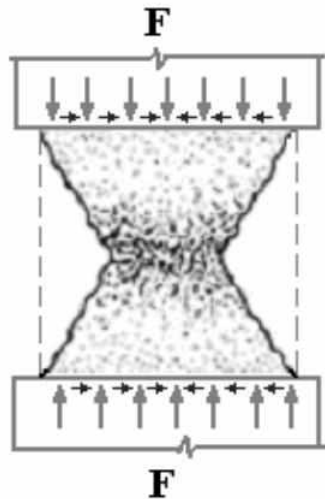


Рисунок 10.2 – Стандартний бетонний куб для визначення міцності на стиск (джерело: [3], с. 21, рис. 2.4)

Кубикова міцність зручна для контролю якості, але реальні стиснуті елементи за формою ближчі до призм. Біля плит преса тертя стримує поперечне розширення куба і штучно підвищує результат. Із віддаленням від торців цей ефект слабшає, тому призмova міцність нижча за кубикову. Для базового пояснення використовують наближене співвідношення:

$$R_b \approx 0.75R$$

а)



б)

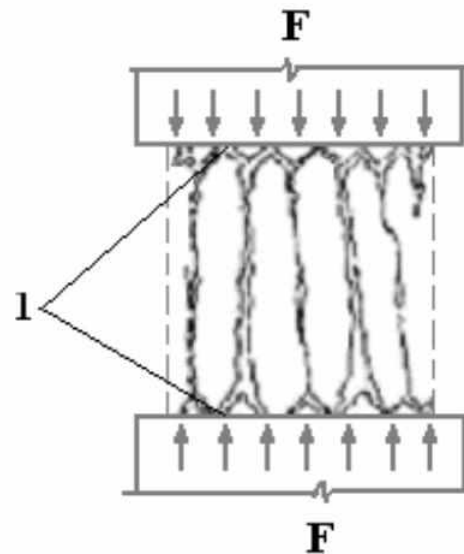


Рисунок 10.3 – Характер деформування бетонного зразка при стиску з тертям і без тертя на опорних площинах (джерело: [3], с. 22, рис. 2.5)

Руйнування при стиску супроводжується розвитком похилих і поздовжніх тріщин, розуцільненням та поперечним розширенням. На результат впливають форма і розмір зразка, швидкість навантаження, вік бетону, вологість і стан контактів із пресом. Тому методика випробування стандартизована.

3. Міцність при розтягу, зрізі та складному стані

Опір осьовому розтягу значно менший за опір стиску, оскільки мікротріщини та слабкі контактні зони швидко об'єднуються в магістральну тріщину. Міцність на розтяг визначають прямим розтягом, розколюванням циліндра або за результатами згину з використанням установлених залежностей.

У конструкціях бетон рідко перебуває в одновісному стані. Біля опор балок діють стиск і зсув, під анкерами — місцевий стиск, у плитах — двовісні напруження. Наявність бічного обтиснення може підвищувати опір стиску, а поперечний розтяг — знижувати його. Саме тому міцність матеріалу не можна переносити на конструкцію без урахування схеми напружень.

4. Фактори, що впливають на міцність

Фактор	Основний вплив
Водоцементне відношення	Надлишок води збільшує капілярну пористість і знижує міцність.
Вік і догляд	За належних вологості й температури гідратація продовжується, міцність зростає.
Ущільнення	Недостатнє ущільнення залишає великі пори та раковини.
Заповнювач	Впливають міцність зерен, гранулометрія, форма та контакт із цементним каменем.
Швидкість навантаження	Короткочасне швидке навантаження дає більшу видиму міцність, ніж тривале.
Температура і вологість	Визначають швидкість тверднення, усадку, морозні й корозійні пошкодження.

Для конструкції важливі не лише склад і лабораторна міцність, а й технологія: дозування, перемішування, транспортування, укладання, ущільнення та догляд. Однаковий проєктний склад може дати різну фактичну якість за різного виконання робіт.

5. Класи бетону і мінливість міцності

Міцність бетону має статистичну мінливість. Навіть зразки одного замісу дають різні результати через неоднорідність сировини й технології. Клас бетону встановлюють не за одиничним середнім значенням, а з урахуванням забезпеченості: імовірність отримати міцність нижчу за гарантовану повинна бути обмеженою.

Під час контролю серія зразків характеризує партію бетону. Стабільність виробництва дає змогу досягати потрібного класу з меншим перевищенням середньої міцності. Марки за морозостійкістю та водонепроникністю описують спеціальні властивості й не замінюють класу міцності на стиск. Розрахункові опори для конструкцій приймають за чинними нормами.

6. Деформативність і модуль пружності

Повна деформація бетону містить умовно пружну та непружну частини:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$

Початковий модуль пружності характеризує нахил початкової ділянки діаграми й визначається відношенням напруження до пружної деформації:

$$E_b = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_{el}}$$

Оскільки діаграма бетону нелінійна, для заданого рівня напружень використовують січний модуль деформацій. Його можна пов'язати з початковим модулем коефіцієнтом пружнопластичності ν :

$$E'_b = \nu E_b$$

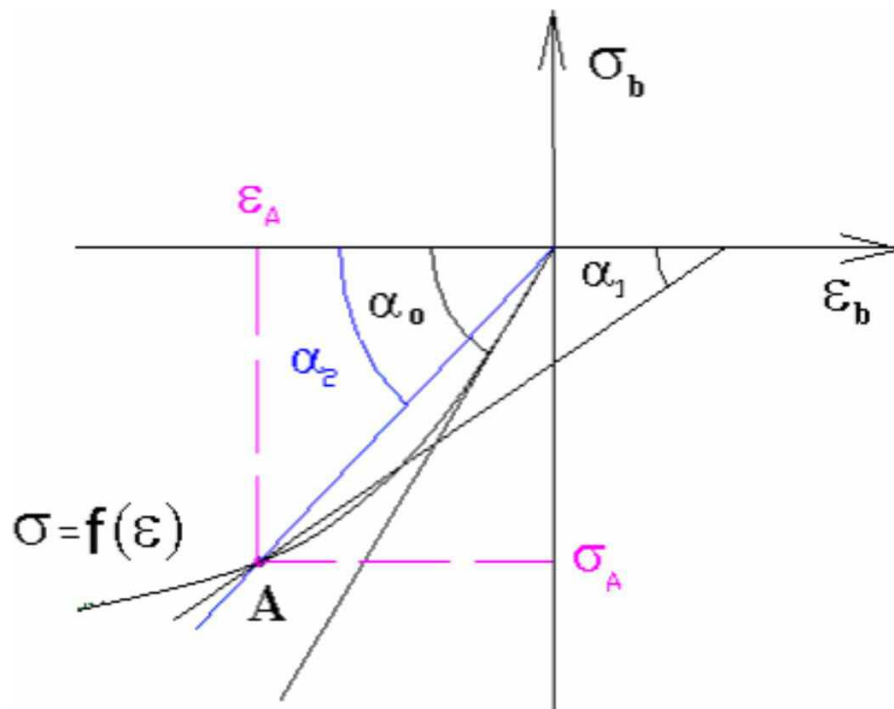


Рисунок 10.4 – Схема визначення модулів деформації бетону (джерело: [3], с. 28, рис. 2.10)

Частку непружної деформації в повній деформації характеризує коефіцієнт пластичності:

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}}$$

Для навантаження, що діє тривалий час, деформації збільшуються навіть при незмінному напруженні. Це явище називають повзучістю. У спрощеному вигляді міру повзучості можна подати як:

$$C_b = \frac{\varepsilon_{pl}}{\sigma_b}$$

Повзучість збільшує прогини балок і плит, змінює розподіл зусиль та втрати попереднього напруження. Вона залежить від віку бетону на момент навантаження, вологості, розмірів елемента, складу й рівня напружень.

7. Усадка, температурні деформації та довговічність

Усадка — зменшення об'єму бетону без зовнішнього навантаження, переважно внаслідок втрати вологи та процесів у цементному камені. Якщо усадці перешкоджають арматура, суміжні ділянки або основа, виникають розтягувальні напруження й тріщини. Вчасний догляд, раціональне армування та деформаційні шви зменшують ризик.

Під час зміни температури бетон розширюється або скорочується. У масивних конструкціях нерівномірне охолодження створює температурні напруження. Морозостійкість залежить від структури пор і водонасичення; водонепроникність — від капілярної пористості та якості ущільнення. Довговічність забезпечують щільний склад, належне ущільнення, догляд, захист від агресивного середовища і своєчасне усунення дефектів.

Висновки

- Бетон є неоднорідним матеріалом, тому його міцність і деформації мають нелінійний та статистично мінливий характер.
- Для розрахунку конструкцій важливішою за кубикову є призмova міцність, а низький опір розтягу зумовлює необхідність армування.
- Повзучість, усадка, температура й умови тверднення впливають на роботу конструкції протягом усього строку експлуатації.

Контрольні запитання

1. З яких компонентів утворюється бетон?
2. Чому надлишок води знижує міцність бетону?
3. Чим відрізняються кубикова та призмova міцність?
4. Чому бетон слабо працює на розтяг?
5. Які технологічні чинники визначають фактичну міцність?
6. Що означає клас бетону за міцністю?
7. Чим початковий модуль пружності відрізняється від січного модуля деформацій?
8. Що таке повзучість та як вона впливає на конструкцію?
9. Що таке усадка і як обмежують усадкове тріщиноутворення?
10. Які властивості визначають довговічність бетону?

Основне джерело лекції: [3, с. 17–30]. Для обов'язкового опрацювання: с. 17–23, 26–30.

Лекція 11. Арматура, властивості залізобетону та основи його розрахунку

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: сформувати цілісне уявлення про призначення арматури, спільну роботу сталі й бетону, стадії напружено-деформованого стану та логіку розрахунку залізобетонного елемента.

Заняття 1 (2 години). Арматура, зчеплення, анкерування і стикування.

Заняття 2 (2 години). Спільна робота бетону й арматури та стадії згину.

План

1. Призначення, види та механічні властивості арматури
2. Арматурні вироби, стики й анкерування
3. Зчеплення арматури з бетоном і спільна робота матеріалів
4. Усадка, повзучість, температурні впливи та корозія
5. Стадії напружено-деформованого стану і гранична висота стиснутої зони

Навчальний матеріал

11.1. Призначення арматури та її робота в конструкції

Бетон добре чинить опір стиску, але має значно меншу міцність на розтяг. Тому в зонах очікуваних розтягувальних напружень установлюють робочу арматуру. У стиснутій зоні арматура потрібна тоді, коли необхідно підвищити несучу здатність, зменшити розміри перерізу або забезпечити роботу елемента за змінного знака зусиль. Конструктивна арматура фіксує робочі стрижні, розподіляє місцеві впливи та обмежує тріщини від усадки й температури [3, с. 31–32].

Вид арматури	Основне призначення	Типове місце
Поздовжня робоча	Сприймає розтяг або стиск від основних зусиль	Розтягнута і, за потреби, стиснута зона балок; колони; розтягнуті елементи
Поперечна	Сприймає частину поперечної сили, обмежує розвиток похилих тріщин	Хомути та поперечні стрижні в балках і колонах
Розподільна	Розподіляє зосереджені впливи, зв'язує робочі стрижні	Плити, стіни, сітки
Монтажна і конструктивна	Забезпечує просторову незмінність каркаса та вимоги конструювання	Каркаси, стики, опорні зони

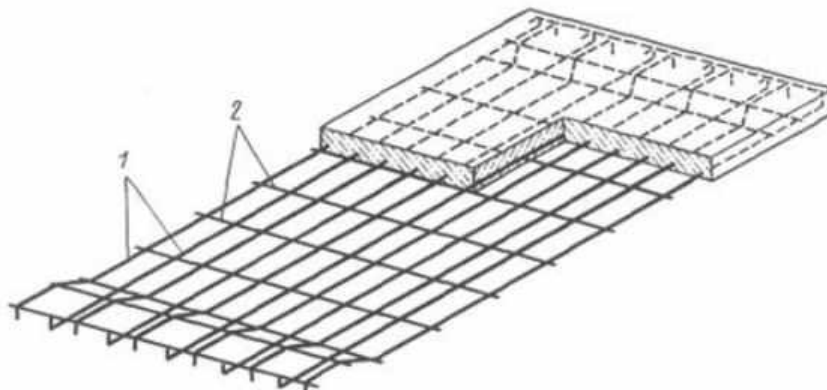


Рисунок 11.1 — Робоча і конструктивна арматура плити (джерело: [3, с. 32, рис. 3.1])

11.2. Види, класи та механічні властивості арматури

Арматуру класифікують за технологією виготовлення (стрижнева або дротяна), профілем поверхні (гладка або періодичного профілю), умовами роботи (ненапружена або попередньо напружена) та призначенням. Періодичний профіль підвищує механічне зачеплення з бетоном. Для проектного вибору важливі міцність, пластичність, зварюваність, витривалість і холодноламкість [3, с. 32–35].

Діаграма «напруження — деформація» показує пружну ділянку, текучість або умовну межу текучості, зміцнення і руйнування. Для сталі без виразної площадки текучості використовують умовну межу, пов'язану із заданою залишковою деформацією. На пружній ділянці діє закон Гука:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

Розрахунковий опір отримують із нормативної характеристики з урахуванням коефіцієнта надійності матеріалу:

$$R_s = \frac{R_{sn}}{\gamma_s}$$

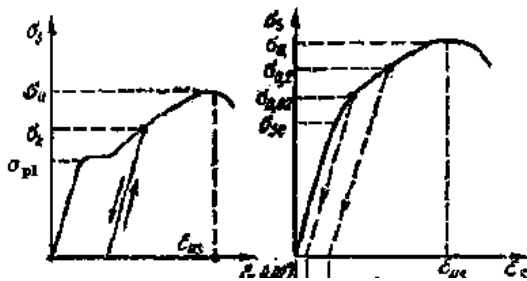


Рисунок 11.2 — Діаграми розтягу арматурної сталі з фізичною та умовною межею текучості (джерело: [3, с. 33, рис. 3.2])

11.3. Арматурні вироби, стикування й анкерування

Сітки складаються з взаємно перпендикулярних стрижнів і застосовуються переважно в плитах та стінах. Плоскі каркаси утворюють поздовжні й поперечні стрижні; кілька плоских каркасів об'єднують у просторовий каркас. Стики виконують зварюванням, механічними муфтами або напуском. Стики не слід без потреби концентрувати в одному перерізі чи в зоні найбільших зусиль [3, с. 35–37].

Анкерування — це передавання зусилля зі стрижня на бетон через зчеплення на достатній довжині. Надійність анкерування визначається профілем і діаметром стрижня, напруженням в арматурі, міцністю бетону, положенням стрижня під час бетонування та поперечним обтисненням. У кресленнях необхідно показувати довжини заведення стрижнів за розрахунковий переріз, місця стиків і крок поперечної арматури.

11.4. Зчеплення сталі з бетоном

Спільна робота залізобетону можлива завдяки адгезії, тертю та механічному зачепленню виступів періодичного профілю. Уздовж довжини анкерування дотичні напруження розподіляються нерівномірно: найбільші значення виникають біля місця введення зусилля. Збільшення діаметра без відповідного збільшення довжини анкерування погіршує умови передавання зусилля [3, с. 39–40].

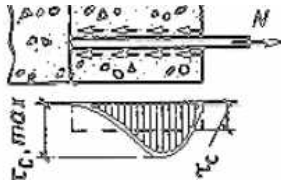


Рисунок 11.3 — Напружений стан арматури й бетону під час витягування стрижня (джерело: [3, с. 40, рис. 4.2])

11.5. Усадка, повзучість, температура та корозія

Усадка бетону спричинює скорочення елемента без зовнішнього навантаження. Арматура стримує вільну усадку, тому в бетоні можуть виникати розтягувальні, а в арматурі — стискальні напруження. Повзучість — зростання деформацій у часі за тривалого навантаження; у залізобетоні вона викликає перерозподіл напружень між бетоном та арматурою. Висока температура знижує міцність і змінює деформаційні властивості, а корозія арматури зменшує її переріз і спричинює розтріскування захисного шару [3, с. 40–43].

Явище	Наслідок для елемента	Конструктивна відповідь
Усадка	Власні деформації, можливі усадкові тріщини	Розподільна арматура, шви, догляд за бетоном
Повзучість	Зростання прогинів, перерозподіл напружень	Урахування тривалості дії та жорсткості
Температура	Деформації, зниження властивостей за нагрівання	Температурні шви, захисні заходи
Корозія	Втрата площі арматури, відшарування бетону	Достатній захисний шар і захист від агресивного середовища

11.6. Стадії роботи залізобетону при згинанні

На стадії I бетон розтягнутої зони ще працює, залежність між напруженнями та деформаціями близька до пружної. Стадія Ia відповідає стану безпосередньо перед утворенням тріщини. На стадії II у розтягнутій зоні з'являються тріщини; в перерізі з тріщиною основне розтягувальне зусилля сприймає арматура, а бетон між тріщинами частково залишається в роботі завдяки зчепленню. Стадія III є граничною: або текучість розтягнутої арматури передуює руйнуванню стиснутого бетону, або переармований переріз руйнується крихко по бетону [3, с. 44–48].

Для сумісної роботи матеріалів до утворення тріщин приймають однаковість деформацій сталі та прилеглого бетону:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_b$$

Щоб забезпечити пластичний характер руйнування, фактична висота стиснутої зони не повинна перевищувати граничну:

$$x \leq \xi_R h_0$$

11.7. Логіка розрахунку залізобетонного елемента

1. Встановити розрахункову схему, навантаження та сполучення впливів.
2. Визначити внутрішні зусилля M , Q , N і небезпечні перерізи.
3. Призначити бетон, арматуру, геометрію перерізу та захисний шар.
4. Перевірити першу групу граничних станів: нормальні й похилі перерізи, стійкість.
5. Перевірити другу групу граничних станів: утворення і ширину тріщин, прогини.
6. Виконати конструювання: анкерування, стики, крок і розміщення арматури.

Висновки

- Арматура компенсує низьку міцність бетону на розтяг і разом із бетоном утворює єдину конструктивну систему.
- Зчеплення та анкерування є умовами фактичного передавання зусиль між матеріалами.
- Розрахунок міцності спирається на граничну стадію, а експлуатаційні перевірки — на тріщиноутворення і деформації.
- Нормально армований переріз має попереджувальний, пластичний характер руйнування.

Контрольні запитання

1. Чому арматуру встановлюють не лише в розтягнутій зоні?
2. За якими ознаками класифікують арматуру?
3. Чим фізична межа текучості відрізняється від умовної?
4. Які механізми створюють зчеплення арматури з бетоном?
5. Від чого залежить довжина анкерування?
6. Як усадка і повзучість змінюють роботу залізобетону?
7. Чим відрізняються стадії I, II та III напружено-деформованого стану?
8. Чому переармований переріз небажаний?
9. Які перевірки належать до першої та другої груп граничних станів?
10. Яка послідовність розрахунку залізобетонного елемента?

Основне джерело лекції: [3, с. 31–50]. Для обов'язкового опрацювання: с. 31–34, 36–40, 44–48; с. 35, 41–43 і 49–50 — для уточнення окремих питань.

Лекція 12. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних елементів

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: навчити визначати несучу здатність згинального елемента за нормальним перерізом, розуміти рівновагу внутрішніх сил і послідовність підбору поздовжньої арматури.

Заняття 1 (2 години). Прямокутний переріз з одиничним армуванням.

Заняття 2 (2 години). Подвійне армування, тавровий переріз і добір стержнів.

План

1. Нормальний переріз і передумови розрахунку
2. Прямокутний переріз з одиночною арматурою
3. Подвійне армування
4. Таврові перерізи
5. Алгоритми перевірки й підбору арматури

Навчальний матеріал

12.1. Що називають нормальним перерізом

Нормальний переріз перпендикулярний до поздовжньої осі елемента. Для балки небезпечні нормальні перерізи розташовані в зонах найбільших згинальних моментів. Після утворення нормальних тріщин бетон розтягнутої зони в розрахунковому перерізі не враховують; розтяг сприймає арматура, стиск — бетон стиснутої зони та, якщо передбачено, стиснута арматура [3, с. 51–52].

Розрахунок міцності нормальних перерізів

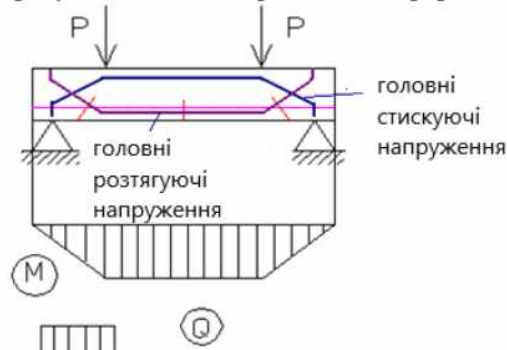


Рисунок 12.1 — Робота згинального залізобетонного елемента та розташування нормальних і похилих тріщин (джерело: [3, с. 51, рис. 6.1])

12.2. Основні передумови розрахунку

- Плоскі перерізи після деформування залишаються плоскими.
- Опір бетону розтягнутої зони в граничному стані за міцністю не враховують.
- Стиснуту зону бетону замінюють розрахунковою епюрою напружень.
- Напруження в арматурі визначають із сумісності деформацій і прийнятих діаграм матеріалів.
- Несуча здатність забезпечена, коли розрахунковий ефект дій не перевищує опору перерізу.

Розрахунок складається з двох незалежних умов рівноваги: суми поздовжніх сил і суми моментів. Перша умова дає висоту стиснутої зони, друга — момент, який може сприйняти переріз.

12.3. Прямокутний переріз з одиночною арматурою

Одиночне армування означає, що розрахункова поздовжня арматура розташована переважно в розтягнутій зоні. Внутрішня сила стиску в бетоні дорівнює силі розтягу в арматурі:

$$R_b b x = R_s A_s$$

Звідси визначають висоту стиснутої зони:

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b}$$

Момент внутрішньої пари сил дорівнює добутку сили стиску на плече між рівнодійними стиску й розтягу:

$$M_{Rd} = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right)$$

Перевірка міцності має вигляд:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

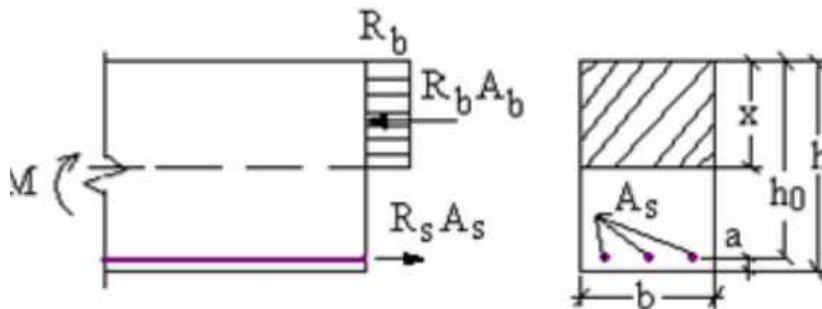


Рисунок 12.2 — Розрахункова схема прямокутного перерізу з одиночною арматурою (джерело: [3, с. 61, рис. 7.7])

12.4. Відносна висота стиснутої зони та характер руйнування

Для зіставлення перерізів використовують відносну висоту стиснутої зони:

$$\xi = \frac{x}{h_0}$$

Якщо стиснута зона не перевищує граничної, розтягнута арматура встигає досягти розрахункового стану, а руйнування має пластичні ознаки. Якщо арматури надто багато, нейтральна вісь піднімається, деформації арматури зменшуються, і бетон стиснутої зони може зруйнуватися до повного використання арматури. Тому збільшення площі арматури не є безмежним способом підвищення несучої здатності [3, с. 48–50, 61–63].

12.5. Подвійне армування

Стиснуту арматуру вводять, коли висота перерізу обмежена, згинальний момент змінює знак або арматура потрібна з конструктивних причин. Рівновага сил для прямокутного перерізу набуває вигляду:

$$R_b b x + R_{sc} A'_s = R_s A_s$$

Несуча здатність складається з моменту бетонної стиснутої зони та пари сил у додатковій арматурі:

$$M_{Rd} = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

Стиснуті стрижні повинні бути надійно закріплені поперечною арматурою. Без хомутів вони можуть втратити стійкість між точками закріплення, а захисний шар — відколотися.

12.6. Таврові перерізи

У ребристих перекриттях плита працює разом із балкою і утворює тавровий переріз. Спочатку визначають положення нейтральної осі. Якщо стиснута зона повністю міститься в полиці, переріз розраховують як прямокутний шириною ефективної полиці. Якщо нейтральна вісь проходить у ребрі, стиск сприймають ребро та звиси полиці; рівнодійні цих частин ураховують окремо [3, с. 64–66].

Положення нейтральної осі	Розрахункова модель	Ключова дія
У межах полиці	Прямокутний переріз шириною ефективної полиці	Визначити x і перевірити, що x не перевищує товщину полиці
У ребрі	Тавровий переріз	Окремо врахувати стиск у ребрі та звисах полиці

12.7. Два типи практичних задач

Перевірка заданого перерізу:

1. За відомими b , h , a , класами матеріалів та A_s знайти h_0 .
2. Із рівноваги сил визначити x і відносну висоту ξ .
3. Переконалися в допустимому характері роботи стиснутої зони.
4. Обчислити M_{Rd} і перевірити $M_{Ed} \leq M_{Rd}$.

Підбір арматури:

1. За M_{Ed} і попередньо прийнятим перерізом визначити потрібну стиснуту зону.
2. Обчислити потрібну площу розтягнутої арматури A_s .
3. Підібрати кількість і діаметр стрижнів за сортаментом.
4. Перерахувати фактичну A_s та повторити перевірку несучої здатності.
5. Перевірити розміщення стрижнів, відстані, захисний шар і анкерування.

12.8. Типові помилки

- Плутати повну висоту h з робочою висотою h_0 .
- Ураховувати бетон розтягнутої зони в граничній несучій здатності.
- Не перевіряти граничну висоту стиснутої зони.
- Механічно збільшувати A_s без оцінки переармування.
- Ігнорувати фактичне розміщення стрижнів, анкерування та захисний шар.

Висновки

- Розрахунок нормального перерізу ґрунтується на рівновазі внутрішніх поздовжніх сил і моментів.
- Для одиночно армованого прямокутного перерізу ключовими параметрами є x , h_0 , A_s і плече внутрішньої пари сил.
- Гранична висота стиснутої зони відокремлює бажаний пластичний механізм від крихкого руйнування бетону.
- Подвійне й таврове армування потребують окремого врахування додаткових складових внутрішніх сил.

Контрольні запитання

1. Який переріз називають нормальним?
2. Чому бетон розтягнутої зони не враховують у розрахунку міцності?
3. Які дві умови рівноваги використовують?
4. Що таке робоча висота перерізу?
5. Як визначають висоту стиснутої зони?
6. Що показує відносна висота ξ ?
7. Коли потрібне подвійне армування?
8. Як розрізняються два випадки роботи таврового перерізу?
9. Чим відрізняється перевірка перерізу від підбору арматури?
10. Які конструктивні перевірки виконують після розрахунку A_s ?

Основне джерело лекції: [3, с. 51–68]. Для обов'язкового опрацювання: с. 51–52, 57–65; с. 53–56 і 66–68 — для розширення та спеціальних випадків.

Лекція 13. Розрахунок залізобетонних елементів за похилими перерізами

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: пояснити причини утворення похилих тріщин, механізми сприйняття поперечної сили та послідовність перевірки й конструювання поперечної арматури.

Заняття 1 (2 години). Похилі тріщини й небезпечний переріз.

Заняття 2 (2 години). Поперечна арматура і послідовність перевірки.

План

1. Напружений стан при спільній дії M і Q
2. Види руйнування за похилим перерізом
3. Роль бетону, хомутив, відгинів і поздовжньої арматури
4. Розрахункова умова міцності
5. Порядок перевірки та конструктивні вимоги

Навчальний матеріал

13.1. Чому виникають похилі тріщини

Біля опор балки одночасно діють згинальний момент і поперечна сила. Їх поєднання створює головні розтягувальні напруження, направлені під кутом до осі елемента. Коли вони перевищують опір бетону розтягу, нормальна тріщина повертає в бік навантаження та стає похилою. Небезпечна зона охоплює приопорну ділянку, де Q велика, а M змінюється вздовж довжини [3, с. 69–72].

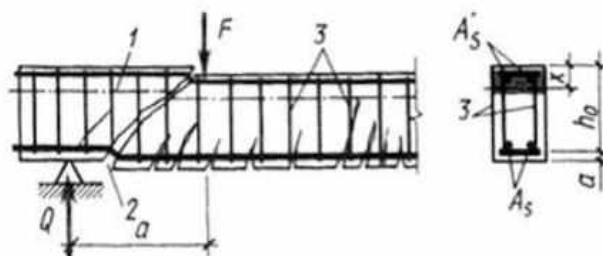


Рисунок 13.1 — Руйнування вигнутого елемента за похилим перерізом від переважаючої дії поперечної сили (джерело: [3, с. 70, рис. 8.2])

13.2. Основні форми руйнування

Форма руйнування	Фізична ознака	Що має запобігти руйнуванню
Між похилими тріщинами	Роздроблення стиснутих бетонних смуг	Достатні розміри перерізу та обмеження рівня стискальних напружень
За похилою тріщиною від Q	Розкриття тріщини і недостатня робота поперечної арматури	Хомути, бетонна складова, правильний крок
За похилим перерізом від M	Недостатнє анкерування або переривання поздовжньої арматури	Заведення і надійне анкерування робочих стрижнів

13.3. Механізм опору після утворення тріщини

Після утворення похилої тріщини поперечна сила передається кількома шляхами: через стиснуту бетонну зону, зачеплення берегів тріщини, нагельну роботу поздовжніх стрижнів та

зусилля в хомутах або відгинах. У навчальній розрахунковій моделі ці складові об'єднують у суму опору бетону й поперечної арматури:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{s,inc}$$

У сучасному скороченому записі ту саму перевірку подають як зіставлення розрахункової поперечної сили з опором бетону та поперечної арматури:

$$Q_{Ed} \leq Q_{Rd,c} + Q_{Rd,s}$$

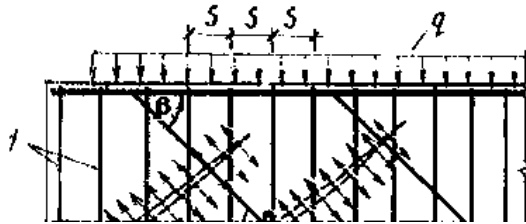


Рисунок 13.2 — Утворення похилих тріщин і перетин їх хомутами та відгинами (джерело: [3, с. 72, рис. 8.5])

13.4. Робота хомутів

Хомути, які перетинають похилу тріщину, розтягуються і передають зусилля між її берегами. Ефективність поперечної арматури залежить від площі гілок у межах одного кроку, розрахункового опору сталі та кроку s . Інтенсивність роботи хомутів можна подати так:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw}}{s}$$

Для розрахункової проєкції похилого перерізу c внесок хомутів має вигляд:

$$Q_{sw} = q_{sw} c$$

Зменшення кроку підвищує кількість гілок, що перетинають потенційну тріщину. Проте хомути мають бути замкнені або надійно заанкеровані; інакше розрахункове зусилля не передасться. Біля опор крок зазвичай приймають меншим, ніж у середині прольоту.

13.5. Вибір небезпечного похилого перерізу

Положення тріщини наперед невідоме. Тому розглядають можливі похилі перерізи з різною довжиною проєкції c і знаходять той, для якого сумарна несуча здатність найменша. Рівномірне навантаження в межах проєкції зменшує поперечну силу, яку має сприйняти переріз. Для безумовно діючих навантажень, наприклад тиску ґрунту чи води, цей ефект ураховують за моделлю джерела [3, с. 71–74].

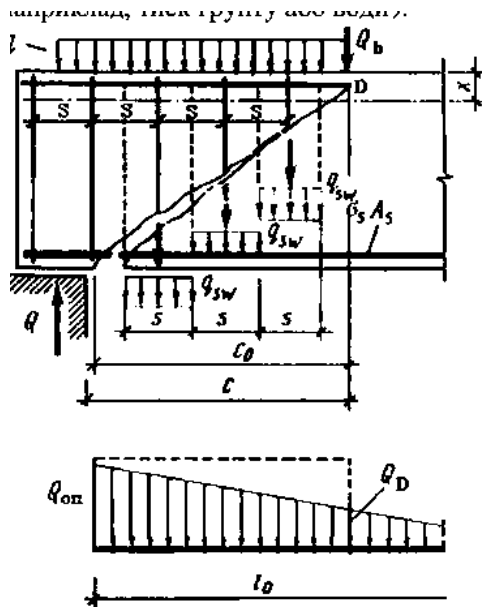


Рисунок 13.3 — Розрахункова схема похилого перерізу за дії поперечної сили (джерело: [3, с. 73, рис. 8.6])

13.6. Перевірка стиснутих бетонних смуг

Навіть за достатньої кількості хомутів елемент може зруйнуватися від роздроблення бетону між похилими тріщинами. Тому перша перевірка обмежує максимальну поперечну силу залежно від ширини b , робочої висоти h_0 , розрахункового опору бетону і впливу поперечної арматури. Якщо ця умова не виконується, лише збільшення площі хомутів не розв’язує проблему — потрібно збільшити переріз або змінити матеріали й схему [3, с. 72–73].

13.7. Послідовність розрахунку

1. Побудувати епюри M і Q та визначити приопорні небезпечні ділянки.
2. Призначити b , h , h_0 , класи бетону й арматури, попередній діаметр і крок хомутів.
3. Перевірити міцність стиснутих бетонних смуг між похилими тріщинами.
4. Визначити внесок бетону $Q_{Rd,c}$ і потрібний внесок поперечної арматури $Q_{Rd,s}$.
5. Призначити A_{sw}/s і перевірити обраний похилий переріз.
6. Перевірити конструктивний мінімум, максимальний крок, анкерування хомутів і заведення поздовжньої арматури.
7. Окремо перевірити похилий переріз за згинальним моментом у місцях обриву або відгинання стрижнів.

13.8. Типові помилки

- Перевіряти лише нормальний переріз і не розглядати приопорну зону.
- Ураховувати хомути, які фактично не перетинають небезпечну тріщину.
- Застосовувати занадто великий крок хомутів біля опори.
- Не перевіряти бетонні стиснуті смуги.
- Обривати поздовжню арматуру без достатнього заведення й анкерування.

Висновки

- Похилі тріщини виникають у зонах спільної дії згинального моменту та поперечної сили.
- Опір похилого перерізу забезпечують бетон, поперечна і поздовжня арматура як єдина система.

- Розрахунок охоплює дві різні небезпеки: роздроблення бетону між тріщинами та розкриття небезпечної похилої тріщини.
- Правильний крок, анкерування хомутів і заведення поздовжніх стрижнів є такими ж важливими, як обчислена площа арматури.

Контрольні запитання

1. Де в балці найімовірніше виникають похилі тріщини?
2. Які напруження спричиняють їх утворення?
3. Які три основні форми руйнування розглядають?
4. Які складові сприймають поперечну силу після утворення тріщини?
5. Як крок хомутів впливає на їх розрахунковий внесок?
6. Чому потрібно перевіряти бетон між похилими тріщинами?
7. Як вибирають небезпечний похилий переріз?
8. Коли навантаження в межах проєкції тріщини зменшує розрахункову Q ?
9. Навіщо перевіряти анкерування поздовжньої арматури?
10. Якою є послідовність розрахунку похилого перерізу?

Основне джерело лекції: [3, с. 69–76]. Для обов’язкового опрацювання: с. 69–74; с. 75–76 — підсумкові формули та самоперевірка.

Лекція 14. Стиснуті та розтягнуті залізобетонні елементи

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: навчити розрізняти центральний і позacentровий стиск та розтяг, складати рівняння рівноваги нормального перерізу й урахувати гнучкість елемента.

План

1. Центральні і позacentрові стиснуті елементи
2. Початковий ексцентриситет і два випадки роботи перерізу
3. Вплив поздовжнього згину та гнучкості
4. Армування стиснутих елементів
5. Центральні і позacentрові розтягнуті елементи

Навчальний матеріал

14.1. Стиснуті елементи та розрахункові зусилля

До стиснутих залізобетонних елементів належать колони, стояки, верхні пояси ферм, елементи оболонок і стіни, на які діє переважно поздовжня сила. Навіть коли навантаження проєктно центральне, реальна сила має випадковий ексцентриситет через геометричні відхилення, неоднорідність матеріалу та неточність прикладання навантаження. Тому більшість колон розглядають як позacentрові стиснуті [3, с. 77–79].

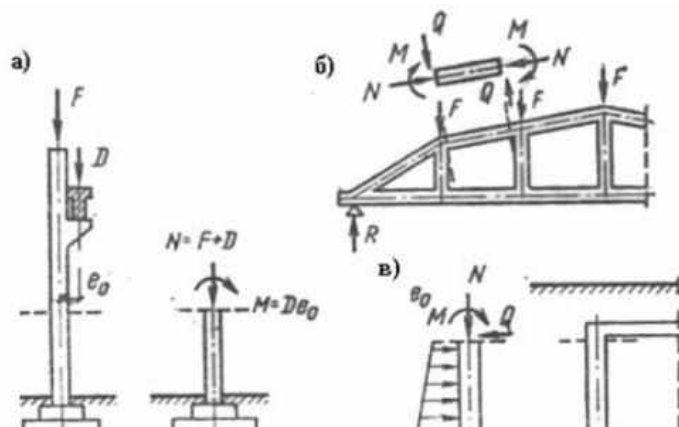


Рисунок 14.1 — Приклади стиснутих залізобетонних елементів (джерело: [3, с. 77, рис. 9.1])

14.2. Центральний стиск

За центрального стиску рівнодійна зовнішніх сил проходить через центр ваги перерізу. У граничному стані стиск сприймають бетон і поздовжня арматура. Умова міцності в навчальній формі:

$$N_{Ed} \leq R_b A_b + R_{sc} (A_s + A'_s)$$

Ця формула пояснює розподіл несучої здатності, але для реальної колони необхідно також урахувати гнучкість, випадковий ексцентриситет, тривалість навантаження та конструктивні вимоги. Поперечна арматура утримує поздовжні стрижні від випинання і обмежує поперечні деформації бетону.

14.3. Позacentровий стиск

Спільну дію поздовжньої сили N і моменту M замінюють силою, прикладеною з ексцентриситетом:

$$e_0 = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

До розрахункового ексцентриситету додають випадкову складову, встановлену умовами проектування. За великого ексцентриситету в перерізі утворюється розтягнута зона з тріщиною, і схема близька до згинального елемента. За малого ексцентриситету більша частина або весь переріз стиснутий, а руйнування визначає бетон стиснутої зони [3, с. 79–82].

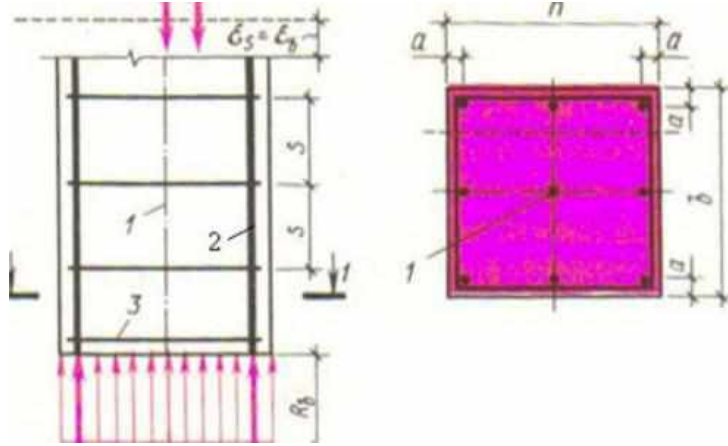


Рисунок 14.2 — Позацентрово стиснутий елемент із випадковим ексцентриситетом (джерело: [3, с. 79, рис. 9.3])

Випадок	Напружений стан	Розрахунковий акцент
Великий ексцентриситет	Є розтягнута зона; розтягнута арматура використовується повніше	Рівновага бетону стиснутої зони та обох рядів арматури
Малий ексцентриситет	Переважає стиск; нейтральна вісь розташована глибоко	Міцність бетону і напруження в менш стиснутій/розтягнутій арматурі

14.4. Рівняння рівноваги позацентрово стиснутого перерізу

Рівновага поздовжніх сил для прямокутної стиснутої зони:

$$N = R_b b x + R_{sc} A'_s - R_s A_s$$

Момент зовнішньої сили відносно осі розтягнутої арматури врівноважується моментами внутрішніх сил:

$$N e = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$$

Невідомою є висота стиснутої зони x , а напруження в арматурі залежать від деформацій. Після знаходження x перевіряють, до якого випадку належить переріз, і чи виконана умова несучої здатності. Для несиметричного армування потрібно уважно призначати знаки сил в арматурі.

14.5. Гнучкість і поздовжній згин

У гнучкому елементі початковий ексцентриситет збільшується внаслідок прогину. Це ефект другого порядку: сила N діє на деформовану схему й створює додатковий момент. Мірою гнучкості є відношення розрахункової довжини до радіуса інерції:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

Чим більша λ , тим суттєвіше зростає момент. Розрахункова довжина l_0 залежить від закріплення кінців і переміщуваності системи. Для коротких елементів вплив прогину може бути малим; для гнучких колон необхідно врахувати збільшення ексцентриситету або виконати розрахунок деформованої схеми [3, с. 82–83].

14.6. Конструювання колон

- Поздовжні стрижні розміщують біля граней перерізу з дотриманням захисного шару.
- У прямокутному перерізі має бути щонайменше по одному стрижню біля кожного кута.
- Хомути фіксують положення стрижнів і запобігають їх випинанню.
- Крок хомутів зменшують у зонах стиків, біля кінців і в місцях концентрації зусиль.
- Стики поздовжньої арматури розміщують і конструюють так, щоб не послабити один небезпечний переріз.

14.7. Розтягнуті елементи

Центрально розтягнутим є елемент, у якому поздовжня сила проходить через центр ваги арматури. Після утворення тріщин бетон у перерізі тріщини практично виключається з опору, тому міцність визначає поздовжня арматура:

$$N_{Ed} \leq R_s A_s$$

За позacentрового розтягу одночасно діють N і M . Якщо сила розташована між рядами арматури, бетон перерізу може бути повністю розтягнутим, а зусилля розподіляється між стрижнями за рівновагою. Якщо рівнодійна лежить поза перерізом, утворюється стиснута зона, і розрахункова схема наближається до позacentрового стиску зі зміненим напрямом N . Для розтягнутих елементів особливо важлива перевірка ширини тріщин [3, с. 86–88].

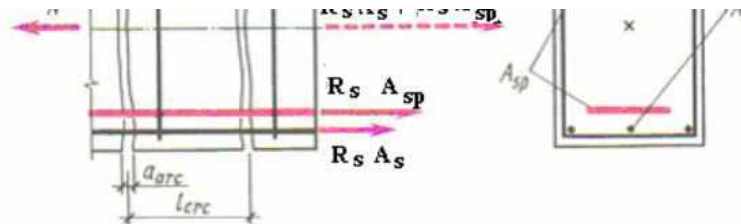


Рисунок 14.3 — Схема зусиль у нормальному перерізі центрально розтягнутого елемента (джерело: [3, с. 87, рис. 9.9])

14.8. Послідовність розрахунку

1. Визначити N_{Ed} , M_{Ed} та їх знаки для небезпечного перерізу.
2. Обчислити початковий ексцентриситет і додати випадкову складову.
3. Встановити розрахункову довжину й оцінити гнучкість.
4. Прийняти попередні розміри, бетон, поздовжню та поперечну арматуру.
5. Скласти рівняння рівноваги, знайти x і визначити випадок роботи перерізу.
6. Перевірити несучу здатність з урахуванням ефектів другого порядку.
7. Перевірити конструювання, стики, крок хомутів, а для розтягу — тріщиностійкість.

Висновки

- Реальні колони розглядають із початковим ексцентриситетом, навіть якщо навантаження задане як центральне.
- Великий і малий ексцентриситет відповідають різним деформаційним станам перерізу.
- Гнучкість збільшує згинальний момент через роботу елемента за деформованою схемою.
- Після утворення тріщин міцність центрально розтягнутого перерізу визначає арматура, але експлуатацію часто обмежує ширина тріщин.

Контрольні запитання

1. Які конструкції належать до стиснутих елементів?
2. Чому центрально навантажену колону фактично розраховують з ексцентриситетом?
3. Як визначається e_0 ?
4. Чим відрізняються великий і малий ексцентриситет?
5. Які сили входять до рівняння рівноваги нормального перерізу?
6. Що таке ефект другого порядку?
7. Від чого залежить розрахункова довжина?
8. Яку функцію виконують хомути в колоні?
9. Як перевіряють центрально розтягнутий елемент за міцністю?
10. Чому для розтягнутих елементів важлива друга група граничних станів?

Основне джерело лекції: [3, с. 77–88]. Для обов’язкового опрацювання: с. 77–83, 86–88; с. 84–85 — спеціальні випадки армування.

Лекція 15. Тріщиностійкість і деформативність залізобетонних елементів

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: сформувати розуміння перевірок другої групи граничних станів: утворення, розкриття й закриття тріщин, кривизни, жорсткості та прогинів.

План

1. Призначення розрахунку за другою групою граничних станів
2. Утворення тріщин
3. Ширина і закриття тріщин
4. Кривизна, жорсткість і прогини
5. Чинники впливу та послідовність перевірки

Навчальний матеріал

15.1. Експлуатаційна придатність

Конструкція може мати достатню несучу здатність, але бути непридатною до нормальної експлуатації через надмірні тріщини або прогини. Тріщини погіршують захист арматури від корозії, водонепроникність і зовнішній вигляд; великі прогини пошкоджують перегородки та оздоблення, порушують ухили й роботу обладнання. Тому друга група граничних станів доповнює, а не замінює перевірку міцності [3, с. 89–90].

Перевірка	Розрахунковий результат	Що обмежується
Утворення тріщин	M_{cr} або N_{cr}	Момент/сила, за яких бетон розтягнутої зони досягає граничного стану
Розкриття тріщин	a_{cr}	Ширина нормальних або похилих тріщин
Закриття тріщин	Стан обтиснення	Залишкове розтягнення в попередньо напружених елементах
Деформації	κ , f , кут повороту	Кривизна, прогин і переміщення

15.2. Стан перерізу до і після утворення тріщин

До утворення тріщин працюють бетон і арматура, а деформації по висоті перерізу розподіляються лінійно. У граничному стані тріщиноутворення напруження в крайньому розтягнутому волокні бетону досягає його розрахункового опору розтягу. Після утворення тріщини в самому перерізі розтяг сприймає переважно арматура; між тріщинами бетон продовжує працювати завдяки зчепленню, тому середня деформація арматури менша, ніж у перерізі тріщини [3, с. 90–94].

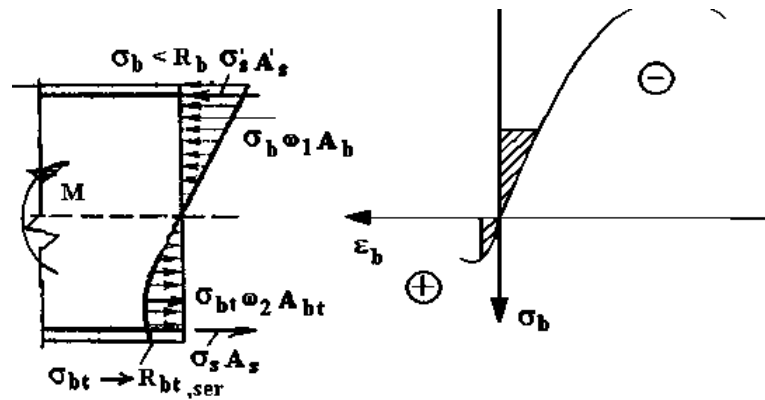


Рис. 10.1. Стадія I напружено-деформованого стану

Рисунок 15.1 — Напружено-деформований стан до утворення тріщин (джерело: [3, с. 90, рис. 10.1])

15.3. Перевірка утворення тріщин

Для згинального елемента порівнюють момент від розрахункових експлуатаційних дій із моментом тріщиноутворення:

$$M_{Ed} \leq M_{crc}$$

M_{crc} визначають за роботою приведенного перерізу без тріщин, опором бетону осьовому розтягу та впливом поздовжньої сили або попереднього обтиснення. Якщо M_{Ed} не перевищує M_{crc} , нормальні тріщини за прийнятою моделлю не утворюються. Якщо умова не виконується, переходять до розрахунку ширини розкриття тріщин. Для центрального розтягу аналогічно порівнюють N_{Ed} і N_{crc} [3, с. 91–95].



Рисунок 15.2 — Стадія до утворення тріщин при центральному розтягу (джерело: [3, с. 91, рис. 10.3])

15.4. Ширина розкриття тріщин

Ширина нормальної тріщини формується як різниця середніх видовжень арматури й бетону на ділянці між суміжними тріщинами:

$$a_{crc} = (\bar{\epsilon}_s - \bar{\epsilon}_{bt}) l_{crc}$$

Розрахункова умова експлуатаційної придатності:

$$a_{crc} \leq a_{lim}$$

На a_{crc} впливають напруження в арматурі, діаметр і крок стрижнів, відсоток армування, зчеплення, захисний шар, тривалість навантаження та відстань між тріщинами. Дрібніші стрижні, розподілені рівномірніше, за тієї самої площі арматури зазвичай краще обмежують ширину тріщин. Граничне значення a_{lim} приймають відповідно до умов експлуатації та вимог до довговічності.

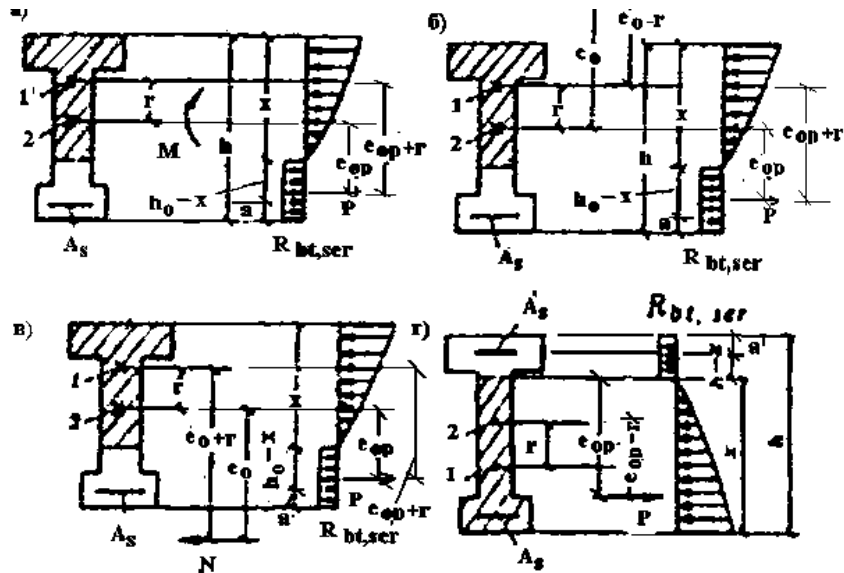


Рис. 10.7. Схеми зусиль та епюри напруження в поперечному перерізі

Рисунок 15.3 — Схеми зусиль і напружень при перевірці утворення тріщин у різних типах елементів (джерело: [3, с. 95, рис. 10.7])

15.5. Закриття тріщин

Перевірка закриття потрібна насамперед для попередньо напружених конструкцій, до яких ставлять вимогу відновлення обтиснення після зняття тимчасового навантаження. Перевіряють, чи не залишаються в крайніх волокнах незворотні розтягувальні деформації та чи забезпечене достатнє обтиснення за постійних і тривалих дій. Для звичайних ненапружених елементів основною є перевірка допустимого розкриття тріщин [3, с. 95–97].

15.6. Кривизна і жорсткість

Кривизна є зміною кута повороту осі на одиницю довжини:

$$\kappa = \frac{1}{r}$$

Для пружної або ефективно-лінійної моделі кривизну пов'язують із моментом і згинальною жорсткістю B :

$$\kappa = \frac{M}{B}$$

До утворення тріщин B визначається приведеним перерізом бетону й арматури. Після тріщиноутворення жорсткість зменшується, бо бетон у перерізах із тріщинами виключається з розтягу. Водночас бетон між тріщинами частково працює; тому для середньої кривизни використовують ефективну жорсткість, проміжну між станом без тріщин і повністю тріснутих станом [3, с. 97–98].

15.7. Короткочасні й тривалі деформації

Повний прогин складається з деформацій від короткочасних і тривалих дій. Тривала складова зростає через повзучість бетону; усадка може спричинити додаткову кривизну за несиметричного армування. Для попередньо напружених елементів окремо враховують вигин від обтиснення. Розрахунок виконують для характерних ділянок зі сталою або наближено сталою кривизною, після чого інтегрують кривизну вздовж прольоту або застосовують коефіцієнти для стандартних схем.

15.8. Як реально зменшити тріщини й прогини

Захід	Вплив на тріщини	Вплив на прогин
Збільшити робочу висоту	Зменшує напруження в арматурі	Суттєво підвищує жорсткість
Рівномірніше розподілити арматуру	Зменшує відстань і ширину тріщин	Помірний вплив
Збільшити A_s у розумних межах	Зменшує напруження сталі	Підвищує жорсткість після тріщиноутворення
Зменшити тривале навантаження	Зменшує тривале розкриття	Зменшує приріст від повзучості
Застосувати попереднє напруження	Відтерміновує або усуває тріщини	Створює протилежну кривизну

15.9. Послідовність перевірки

1. Сформулювати експлуатаційні сполучення навантажень і визначити M , N , Q .
2. Встановити категорію вимог до тріщиностійкості й допустиму ширину тріщин.
3. Обчислити M_{cr} або N_{cr} і визначити, чи утворюються тріщини.
4. За наявності тріщин визначити напруження та середні деформації арматури, l_{cr} і a_{cr} .
5. Визначити кривизну ділянок без тріщин і з тріщинами з урахуванням тривалих впливів.
6. Обчислити прогин та порівняти його з допустимим значенням.
7. За невиконання вимог змінити висоту, армування, схему або рівень попереднього напруження.

Висновки

- Друга група граничних станів забезпечує придатність, довговічність і нормальний зовнішній вигляд конструкції.
- Після утворення тріщин жорсткість зменшується, але бетон між тріщинами частково продовжує працювати.
- Ширина тріщин визначається не лише площею арматури, а й її діаметром, розподілом, зчепленням та тривалістю навантаження.
- Прогин залежить від розподілу кривизни вздовж елемента та зростає в часі через повзучість і усадку.

Контрольні запитання

1. Чому перевірка міцності не замінює перевірку експлуатаційної придатності?
 2. Що фізично означає момент тріщиноутворення?
 3. Як змінюється робота перерізу після появи тріщини?
 4. Від яких чинників залежить ширина тріщини?
 5. Чому рівномірний розподіл дрібніших стрижнів може бути ефективним?
 6. Коли перевіряють закриття тріщин?
 7. Що таке кривизна елемента?
 8. Чому жорсткість після тріщиноутворення зменшується?
 9. Як повзучість і усадка впливають на прогин?
 10. Якою є послідовність розрахунку за другою групою граничних станів?
- Основне джерело лекції: [3, с. 89–98]. Для обов'язкового опрацювання: с. 89–95, 97–98; с. 96 — уточнення розрахунку ширини тріщин.

Лекція 16. Плоскі залізобетонні перекриття

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: розрізнити конструктивні системи плоских перекриттів, визначати напрямок роботи плити та шлях передавання навантаження.

План

1. Види плоских перекриттів.
2. Ребриста плита та балкова система.
3. Безбалкові, збірні та збірно-монолітні перекриття.
4. Розрахункова схема та вихідні дані.

Навчальний матеріал

1. Призначення і класифікація плоских перекриттів

Плоске перекриття розділяє поверхи та сприймає власну вагу, вагу підлоги, перегородок і корисне навантаження. Його плита передає зусилля балкам або безпосередньо колонам і стінам. Під час вибору системи важливі прольоти, сітка колон, вимоги до висоти поверху, спосіб зведення та можливість улаштувати інженерні мережі. Павліков поділяє такі перекриття за конструктивною схемою на балкові та безбалкові, а за способом виготовлення — на монолітні, збірні та збірно-монолітні [2, с. 23–25].

Монолітна плита працює разом із бетоном балки після тверднення; у збірному перекритті заводські елементи мають окремі опорні ділянки і стики. У збірно-монолітній системі збірні частини та бетон замонолічування після набору міцності утворюють спільну конструкцію. Однакова назва «перекриття» тому не означає однакової розрахункової схеми. Студент має простежити, яким шляхом вага кожної частини доходить до стіни, колони й фундаменту.

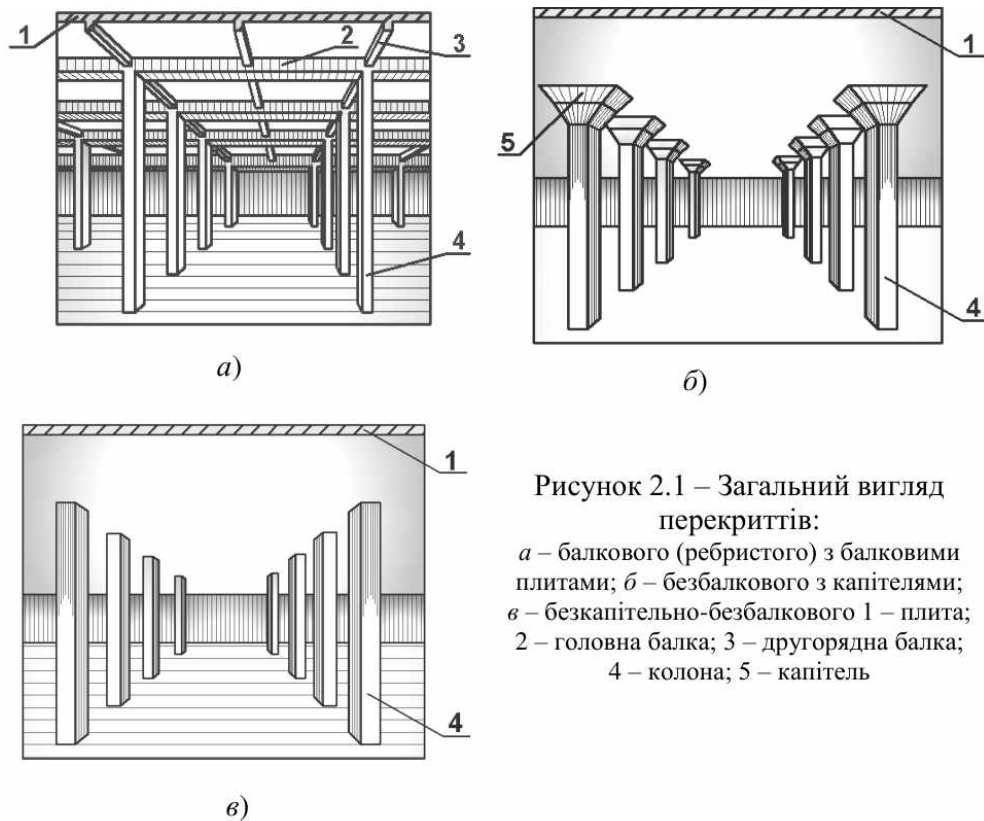


Рисунок 16.1 – Балкове та два безбалкові перекриття. Фрагмент рисунка 2.1 з підручника Павлікова [2, с. 23].

2. Ребристе перекриття і напрямок роботи плити

У балковому ребристому перекритті можна відокремити плиту, другорядні та головні балки. Плита передає навантаження на другорядні балки; ті передають його головним балкам; головні балки спираються на колони чи стіни. Ребра розміщують там, де у нижній розтягнутій зоні потрібні арматура та бетон навколо неї. Таке компонування дає змогу не робити однаково товстою всю площу перекриття [2, с. 25–27].

Плита між паралельними опорами переважно працює у напрямку, перпендикулярному до них. Коли опори охоплюють її з усіх боків, передавання навантаження можливе в обох напрямках; визначальними стають відношення сторін і жорсткість крайових елементів. Перед складанням схеми необхідно показати прольоти, осі опор, напрямок передавання навантаження та ділянки можливих від'ємних моментів над проміжними опорами. Поняття «балкова плита» описує характер роботи ділянки, а не спосіб виготовлення всього перекриття.

оперті по контуру (якщо вони працюють у двох напрямках).

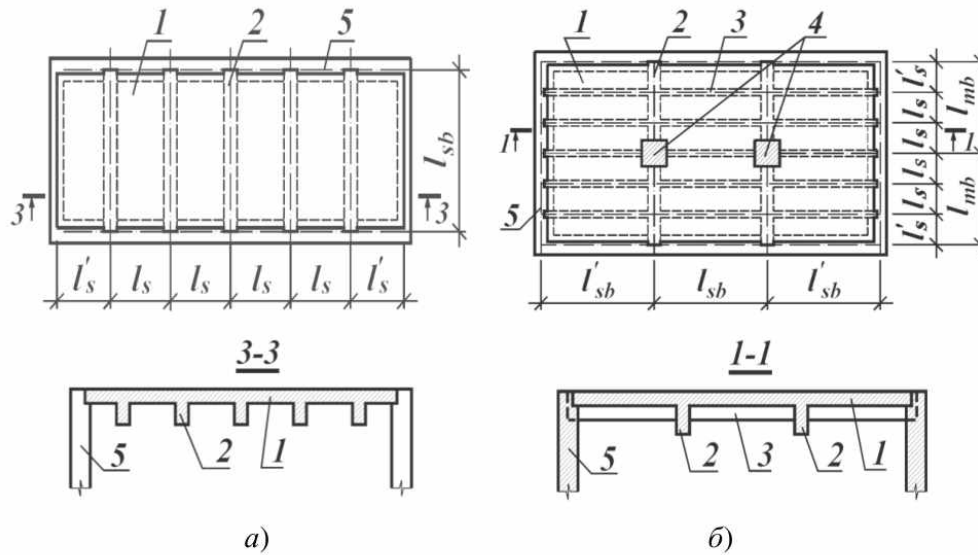


Рисунок 2.2 – Плани монолітних перекриттів:
а – ребристого з балками в одному напрямку; б – ребристого з балками у двох напрямках; 1 – плита; 2 – головна балка; 3 – другорядна балка; 4 – колона; 5 – стіна

Рисунок 16.2 – Плани ребристих монолітних перекриттів і перерізи. Фрагмент рисунка 2.2 з підручника Павлікова [2, с. 24].

3. Безбалкові, збірні та збірно-монолітні рішення

Безбалкове перекриття передає навантаження від плити безпосередньо на колони. У місці контакту колони і плити можливі значні місцеві зусилля, тому застосовують капітелі, потовщення або спеціальне армування. За відсутності балок отримують вільніший простір, але потрібно окремо розглядати роботу зони навколо опори. Для збірного перекриття важливі типи плит, довжина обпирання, стики й спільна робота елементів [2, с. 57–60, 74–76].

У збірно-монолітному варіанті монтажні та експлуатаційні стадії не збігаються: до замонолічування елемент має власну монтажну схему, а після тверднення бетону конструкція працює інакше. Тому навчальний аналіз починають із перевірки того, яка частина сприймає навантаження на кожній стадії. Для цього достатньо схеми опирання та словесного пояснення спільної роботи, без детального розрахунку просторової системи.

4. Вихідні дані й навчальна послідовність розрахунку

Спочатку встановлюють геометрію будівлі: крок колон, прольоти, товщину плити, перерізи балок і схему їх опирання. Далі поділяють навантаження на постійні й тимчасові, визначають смугу збирання для балки та складають її лінійне навантаження. Для кожної плити або балки виділяють розрахункову схему, знаходять згинальні моменти й поперечні сили, а вже потім перевіряють міцність, прогин і конструктивне армування. У реальному проєкті комбінації навантажень і граничні значення приймають за чинними нормами.

Для пояснення без числового нормативного добору візьмімо плиту, яка спирається на дві паралельні балки. Навантаження з площі плити спочатку переходить до цих балок, потім до головної балки, якщо вона є, і далі до колон. Зміна напрямку другорядних балок змінює навантаження головної балки та її розрахунковий проліт. Результат компоновання потрібно оцінювати разом із висотою перекриття, шляхом зусиль і можливістю розмістити стики.

Висновки

Плоске перекриття розглядають як систему елементів, з'єднаних шляхом передавання навантаження. Різниця між балковою та безбалковою схемами полягає насамперед у способі опирання плити. Поділ на монолітні, збірні та збірно-монолітні визначає також особливості стиків і стадій роботи. Перед розрахунком слід намалювати власну схему опор і підписати напрямок роботи кожної ділянки.

Контрольні запитання

1. Яким шляхом навантаження передається від плити балкового перекриття до колон? 2. За якими двома ознаками класифікують плоскі перекриття? 3. Що відрізняє безбалкове перекриття від ребристого? 4. Чому у збірно-монолітному перекритті враховують стадії зведення? 5. Які вихідні дані потрібні для вибору розрахункової схеми плити?

Основне джерело лекції: Павліков [2, с. 23–25]; для схем збірних і безбалкових систем — [2, с. 57–60, 72–76].

Лекція 17. Типи фундаментів і вихідні дані для їх проєктування

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: сформувати базове розуміння сумісної роботи споруди, фундаменту й ґрунтової основи, навчити читати інженерно-геологічний розріз і визначати основні фізичні, міцнісні та деформаційні характеристики ґрунтів.

План

1. Система «споруда — фундамент — основа».
2. Класифікація основ і фундаментів.
3. Вихідні дані для проєктування.
4. Фізичні характеристики ґрунтів.
5. Показники стану пісків і глинистих ґрунтів.
6. Міцнісні та деформаційні характеристики.
7. Порядок оцінювання інженерно-геологічних умов.

Навчальний матеріал

Джерельна основа

Джерело: Тютькін та співавтори [6, с. 8–18, 23–28]. Для заняття опрацювати с. 8–14 і 23–24; решта сторінок — довідково.

Типи фундаментів за конструктивною схемою

Окремий фундамент передає навантаження від колони через одну підшву; стрічковий проходить під протяжною стіною чи рядом опор; плитний сприймає навантаження від кількох частин будівлі на великій площі. Фундаменти мілкового закладання передають тиск переважно через підшву на верхні шари, а пальові — через стовбур і нижній кінець на глибші шари. Перший вибір визначають навантаження, шари ґрунту й рівень підземних вод; самі назви конструкцій не замінюють перевірку основи [6, с. 8–14].

1. Система «споруда — фундамент — основа»

Фундамент є підземною частиною споруди, що приймає навантаження від надземних конструкцій і передає їх на ґрунт. Основа — масив ґрунту, який сприймає тиск від підшви фундаменту. Тому фундамент і основа розглядаються спільно: достатньо міцний фундамент не забезпечить надійність, якщо ґрунт втратить несучу здатність або зазнає надмірних деформацій.

Тиск розподіляється в об'ємі ґрунту, а не лише безпосередньо під підшвою. У міру заглиблення додаткові напруження зменшуються й охоплюють більшу площу. Розрахунок має встановити, чи не буде досягнуто граничного стану за несучою здатністю і чи залишаться осідання та крен допустимими.

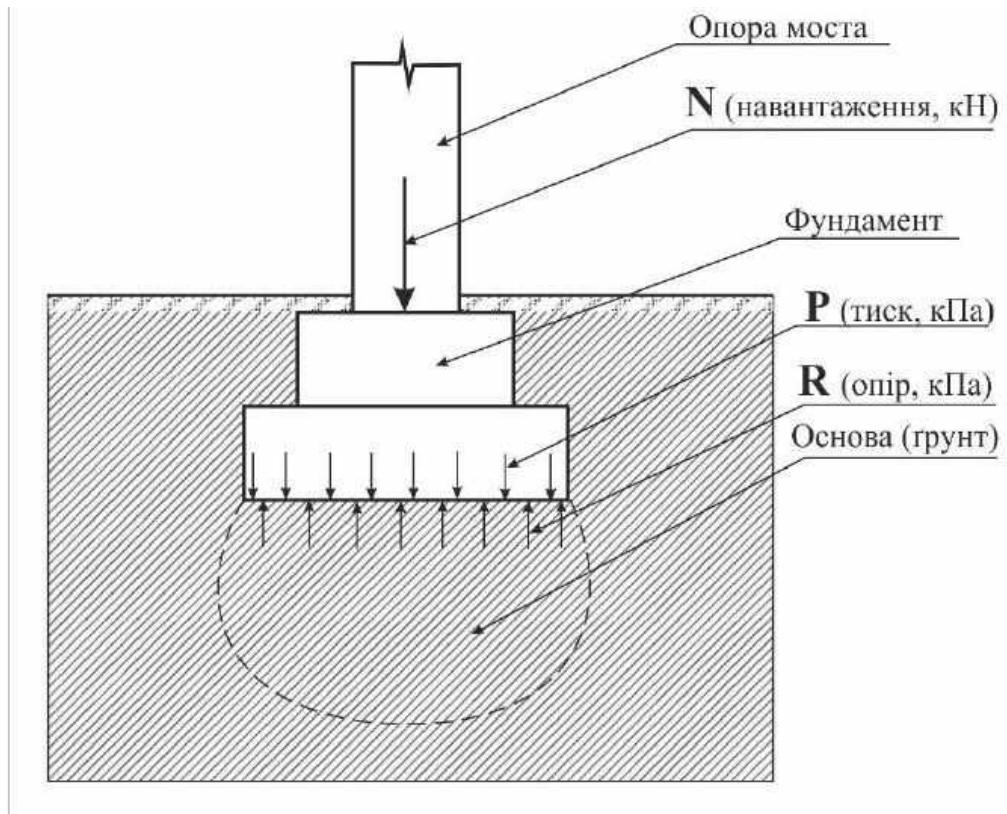


Рисунок 17.1 – Схема сумісної роботи споруди, фундаменту та ґрунтової основи (джерело: [6, с. 8, рис. 1.1])

2. Природні та штучні основи

Природною називають основу, ґрунти якої можуть сприймати проєктне навантаження без спеціального поліпшення. Штучну основу створюють, коли природний ґрунт має недостатню міцність, надмірну стисливість або нестійкий стан. Перед вибором способу поліпшення потрібно встановити причину незадовільної роботи, межі слабкого шару та положення ґрунтових вод.

За глибиною передавання навантаження фундаменти поділяють на мілкого і глибокого закладання. Для промислового та цивільного будівництва застосовують окремі, стрічкові, перехресно-стрічкові, суцільні плитні та пальові фундаменти. Тип визначають конструктивною системою будівлі, величиною навантажень і ґрунтовими умовами.

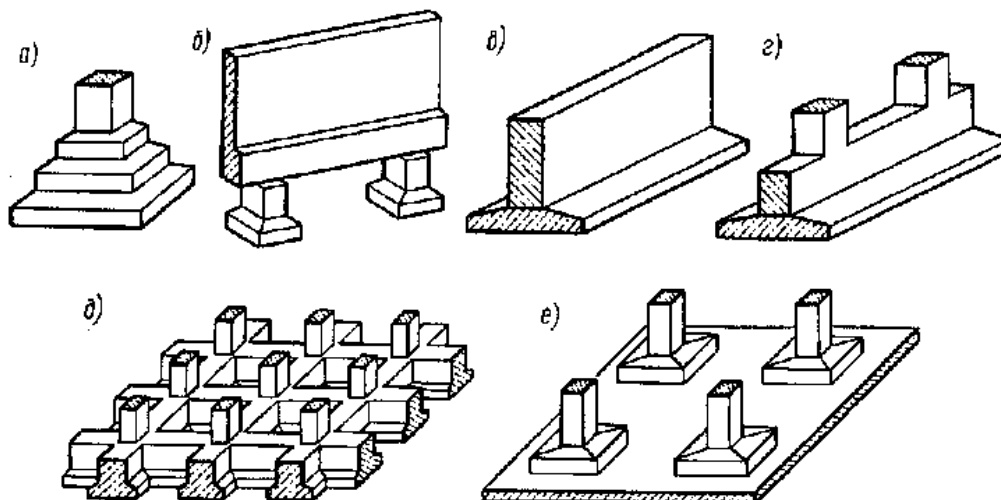


Рисунок 17.2 – Основні типи фундаментів мілкого закладання для промислових і цивільних будівель (джерело: [6, с. 14, рис. 1.8])

3. Вихідні дані для проєктування

- інженерно-геологічний розріз із межами шарів, лінз і прошарків;
- фізичні, міцнісні та деформаційні характеристики кожного інженерно-геологічного елемента;
- положення та можливі сезонні коливання рівня ґрунтових вод;
- розрахункові навантаження на рівні обрізу фундаменту;
- розміри, жорсткість і чутливість споруди до нерівномірних осідань;
- умови сусідньої забудови, підземні комунікації та технологія виконання робіт.

Інженерно-геологічний елемент — відносно однорідний шар або частина шару, для якого властивості можуть бути прийняті усередненими. Межі елементів установлюють за складом, станом, текстурою, результатами лабораторних випробувань і зондування.

4. Основні фізичні характеристики ґрунтів

Позначення	Назва	Фізичний зміст
γ_s	питома вага твердих частинок	характеризує мінеральну складову ґрунту
γ	питома вага природного ґрунту	вага одиниці об'єму ґрунту в природному стані
w	природна вологість	відношення маси води до маси сухого ґрунту
e	коефіцієнт пористості	відношення об'єму пор до об'єму твердих частинок
Sr	ступінь водонасичення	частка пор, заповнених водою
WL, WP	межі текучості та пластичності	характерні вологості глинистого ґрунту

Питома вагу сухого ґрунту визначають за природною питомою вагою і вологістю:

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w) \quad (17.1)$$

Коефіцієнт пористості:

$$e = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d \quad (17.2)$$

Ступінь водонасичення:

$$S_r = w \cdot \gamma_s / (e \cdot \gamma_w) \quad (17.3)$$

де γ_w — питома вага води. Значення S_r змінюється від 0 для сухого стану до 1 для повного водонасичення.

5. Показники стану пісків

Для пісків важливі гранулометричний склад, коефіцієнт пористості та ступінь водонасичення. За щільністю складу пісок оцінюють через показник, що зіставляє природний коефіцієнт пористості з гранично пухким і гранично щільним станами:

$$I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}) \quad (17.4)$$

За зростання I_D пісок переходить від пухкого до щільного стану. Зі збільшенням водонасичення й зменшенням щільності зазвичай зростає стисливість і зменшується опір зсуву.

6. Показники стану глинистих ґрунтів

Глинисті ґрунти класифікують за числом пластичності I_p і показником текучості I_L . Число пластичності визначає діапазон вологості пластичного стану:

$$I_p = W_L - W_P \quad (17.5)$$

Показник текучості характеризує фактичний стан ґрунту відносно меж пластичності:

$$I_L = (w - W_P) / (W_L - W_P) \quad (17.6)$$

Негативне або мале I_L відповідає твердому чи напівтвердому стану; збільшення I_L означає перехід до тугопластичного, м'якопластичного й текучого стану. Для фундаментів небезпечними є слабкі водонасичені глинисті ґрунти з великою стисливістю.

7. Міцнісні та деформаційні характеристики

Опір ґрунту зсуву визначають кутом внутрішнього тертя φ і питомим зчепленням c . Деформативність описують модулем деформації E . Ці характеристики не обчислюють лише за назвою ґрунту: їх устанавлюють за випробуваннями та статистичною обробкою результатів.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (17.7)$$

Залежність (17.7) пояснює, що опір зсуву складається зі зчеплення та складової тертя, яка зростає з нормальним напруженням σ . Для пісків основною є складова тертя; для глинистих ґрунтів істотне значення має зчеплення, яке залежить від стану і водонасичення.

Модуль деформації E пов'язує приріст напруження з деформацією в прийнятому інтервалі роботи. Менший E означає більшу стисливість і більші осідання за однакового тиску. Для розрахунку потрібні розрахункові, а не довільні табличні значення.

8. Навчальний приклад визначення стану ґрунту

Нехай $\gamma = 19,0 \text{ кН/м}^3$, $\gamma_s = 26,5 \text{ кН/м}^3$, $w = 0,15$, $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$. Тоді:

$$\gamma_d = 19,0 / 1,15 = 16,52 \text{ кН/м}^3 \quad (17.8)$$

$$e = (26,5 - 16,52) / 16,52 = 0,604 \quad (17.9)$$

$$S_r = 0,15 \cdot 26,5 / (0,604 \cdot 10) = 0,658 \quad (17.10)$$

Отриманий $S_r \approx 0,66$ показує вологий, але не повністю водонасичений стан. Приклад демонструє лише послідовність обчислень; для проєктування використовують дані інженерно-геологічного звіту.

9. Порядок оцінювання інженерно-геологічних умов

1. Розділити ґрунтову товщу на інженерно-геологічні елементи.
2. Для кожного шару встановити назву, стан, потужність і розрахункові характеристики.
3. Нанести рівень ґрунтових вод і оцінити можливі зміни водного режиму.
4. Виділити слабкі, насипні, заторфовані, просадні або водонасичені шари.
5. Зіставити глибину залягання міцного шару з можливими типами фундаментів.
6. Оцінити несучу здатність, осідання та небезпеку нерівномірних деформацій.
7. Порівняти варіанти фундаментів за надійністю, технологічністю та економічністю.

Типові помилки

- вибирати фундамент без інженерно-геологічного розрізу;
- підміняти розрахункові характеристики середніми або довідковими;
- не враховувати ґрунтові вод і сезонну зміну вологості;
- вважати неоднорідну товщу одним шаром;
- оцінювати лише міцність, не перевіряючи деформації.

Висновки

Проектування фундаменту починається з ґрунту, а не з вибору готової конструкції. Фізичні показники описують склад і стан ґрунту, міцнісні — опір зсуву, деформаційні — схильність до осідання. Лише їх спільне врахування дає обґрунтований тип фундаменту.

Контрольні запитання

1. Чим фундамент відрізняється від основи?
2. Коли основу називають природною, а коли штучною?
3. Які вихідні дані потрібні для проектування фундаменту?
4. Що показують e та S_r ?
5. Як оцінюють щільність піску?
6. Що характеризують I_p та I_L ?
7. Яку роль відіграють c , φ та E ?
8. Чому рівень ґрунтових вод впливає на вибір фундаменту?

Лекція 18. Розрахунок фундаментів мілкового закладання

Тривалість: 4 академічні години (2 заняття по 2 години).

Мета: навчити обґрунтовувати тип і глибину фундаменту мілкового закладання, виконувати попередній добір площі підшви, перевіряти тиск на ґрунт і пояснювати основні конструктивні вимоги.

План

1. Умови застосування і типи фундаментів.
2. Вибір глибини закладання.
3. Попередній добір площі підшви.
4. Перевірка тиску та несучої здатності основи.
5. Перевірка слабкого шару і деформацій.
6. Конструювання фундаменту.
7. Послідовність навчального розрахунку.

Навчальний матеріал

Джерельна основа

Лекцію підготовлено за підручником [6, с. 28–43]. Для самостійного опрацювання достатньо цих 16 сторінок; розділи про котловани й водозниження до цієї лекції не включено.

Заняття 1 (2 години). Глибина закладання, добір підшви та несуча здатність.

1. Умови застосування і типи

Фундаменти мілкового закладання передають навантаження на ґрунт через підшву й споруджуються у відкритому котловані. Їх доцільно застосовувати, коли на доступній глибині є достатньо міцний і малостисливий шар, а осідання залишаються допустимими.

- окремі фундаменти — під колони, стояки та локальні опори;
- стрічкові — під несучі стіни або ряди колон;
- перехресно-стрічкові — за потреби спільного розподілу навантаження у двох напрямках;
- суцільні плитні — під усією будівлею за великих навантажень або неоднорідних ґрунтів;
- масивні — під опори та споруди з великими зосередженими навантаженнями.

2. Глибина закладання

Глибину закладання вимірюють від поверхні землі або дна водойми до підшви. Вона залежить від будови ґрунтової товщі, глибини промерзання, положення ґрунтових вод, підвалів і підземних комунікацій, величини навантаження та технології робіт.

Підшву потрібно розмістити в однорідному опорному шарі. Не слід залишати під різними частинами фундаменту різкі перепади стисливості. Якщо слабкий прошарок розташований близько під підшовою, його перевіряють окремо на продавлювання і деформації.

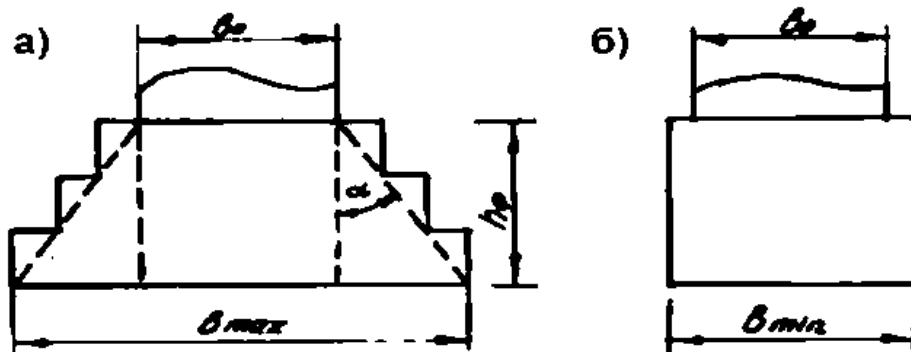


Рисунок 18.1 – Фундаменти з розширеною підшовою та без розширення (джерело: [6, с. 29, рис. 3.1])

3. Попередній добір площі підшови

На першому наближенні площу підшови визначають діленням розрахункового вертикального навантаження на допустимий для основи тиск. У спрощеній навчальній формі:

$$A_{\text{req}} \approx N_{\text{tot}} / R \quad (18.1)$$

Тут N_{tot} охоплює навантаження від споруди, власну вагу фундаменту та ґрунту на його уступах; R — розрахунковий опір ґрунту. Після прийняття реальних розмірів площу, вагу і тиски уточнюють.

Для центрально завантаженої прямокутної підшови середній тиск:

$$p_{\text{avg}} = \Sigma N / A \quad (18.2)$$

Для квадратної підшови попередній розмір сторони $B = \sqrt{A_{\text{req}}}$. Прийнятий розмір округлюють у більший бік з урахуванням конструктивного модуля та можливості виконання робіт.

4. Тиск при позацентровому навантаженні

За наявності моментів тиск під підшовою стає нерівномірним. Для прямокутної підшови при лінійному розподілі:

$$p_{\text{max,min}} = \Sigma N / A \pm \Sigma M_x / W_x \pm \Sigma M_y / W_y \quad (18.3)$$

Максимальний тиск не повинен перевищувати допустиму межу, а мінімальний — ставати від'ємним. Від'ємне значення означає відрив частини підшови від ґрунту, що для звичайного фундаменту не допускається.

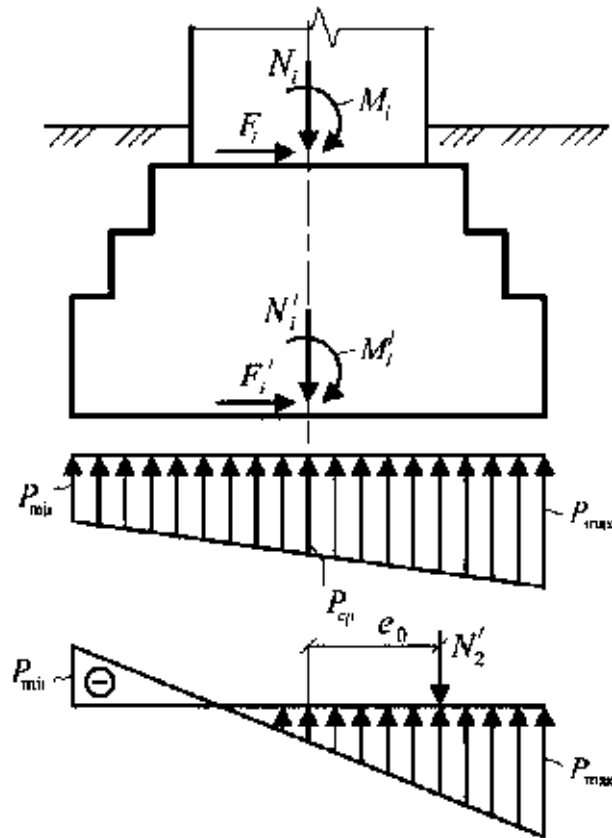


Рисунок 18.2 – Етюри тиску під підшовою фундаменту за центральної та позацентральної дії (джерело: [6, с. 38, рис. 4.3])

5. Перевірка несучої здатності основи

Після призначення розмірів перевіряють середній і крайові тиски. Загальна логіка перевірки:

$$p_{avg} \leq R / \gamma_n \quad (18.4)$$

$$p_{max} \leq \gamma_c \cdot R / \gamma_n \quad (18.5)$$

$$p_{min} > 0 \quad (18.6)$$

Коефіцієнти γ_n і γ_c враховують призначення споруди та умови роботи. Їх числові значення для реального проекту приймають за чинними нормами. Перевірка виконується для несприятливих сполучень навантажень.

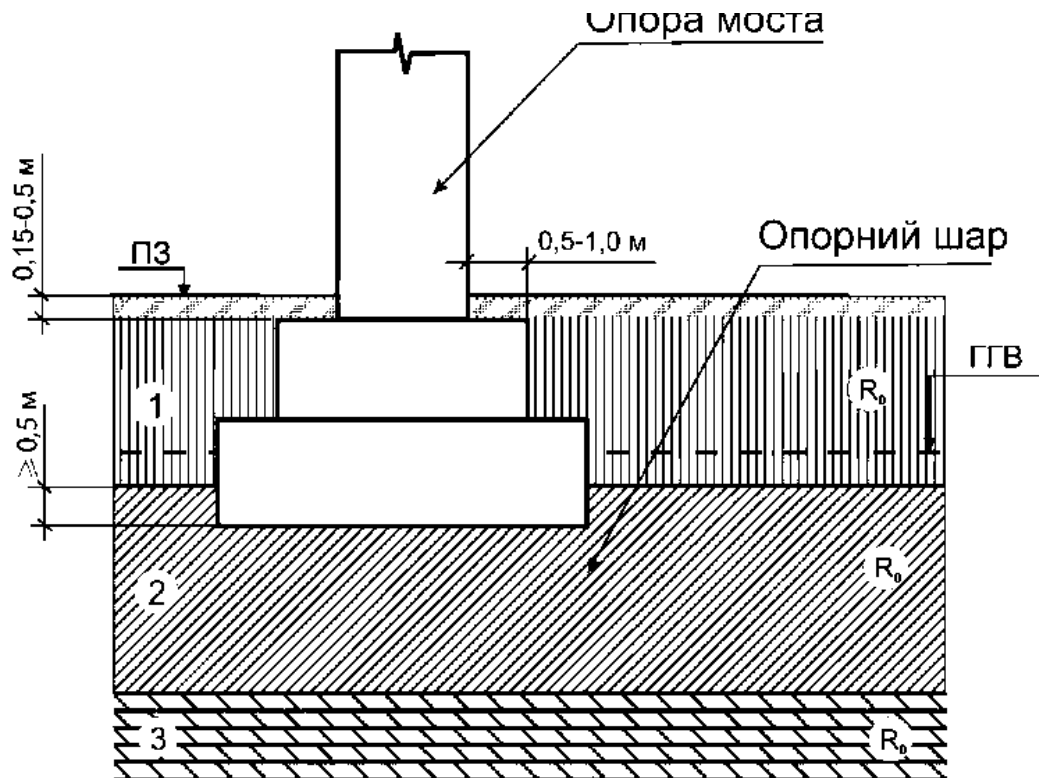


Рисунок 18.3 – Фундамент мілкого закладання в інженерно-геологічному розрізі (джерело: [6, с. 35, рис. 4.1])

Заняття 2 (2 години). Слабкий шар, осідання, крен та конструктивне рішення.

6. Перевірка слабого шару

Якщо нижче міцного верхнього шару залягає слабкий, перевіряють напруження на його покрівлі. Навантаження розсіюється з глибиною, проте слабкий шар може стати визначальним для несучої здатності або осідання. Тому недостатньо перевірити лише ґрунт безпосередньо під підшовою.

Перевірка включає визначення власної ваги шарів, додаткового напруження від фундаменту й порівняння сумарного тиску з опором слабого шару. За незадовільного результату збільшують площу, змінюють глибину закладання або переходять до фундаменту, що передає навантаження на глибший міцний шар.

7. Розрахунок за деформаціями

Друга група граничних станів охоплює осідання, різницю осідань і крен. У навчальній схемі ґрунтову товщу поділяють на розрахункові шари, визначають додаткові вертикальні напруження та підсумовують деформації шарів у межах стисливої товщі.

$$s = \sum s_i \quad (18.7)$$

Нижню межу стисливої товщі приймають там, де додаткові напруження стають малими порівняно з природними. Особливо небезпечні не абсолютні, а нерівномірні осідання: вони спричиняють тріщини, перекоси й додаткові зусилля в надземних конструкціях.

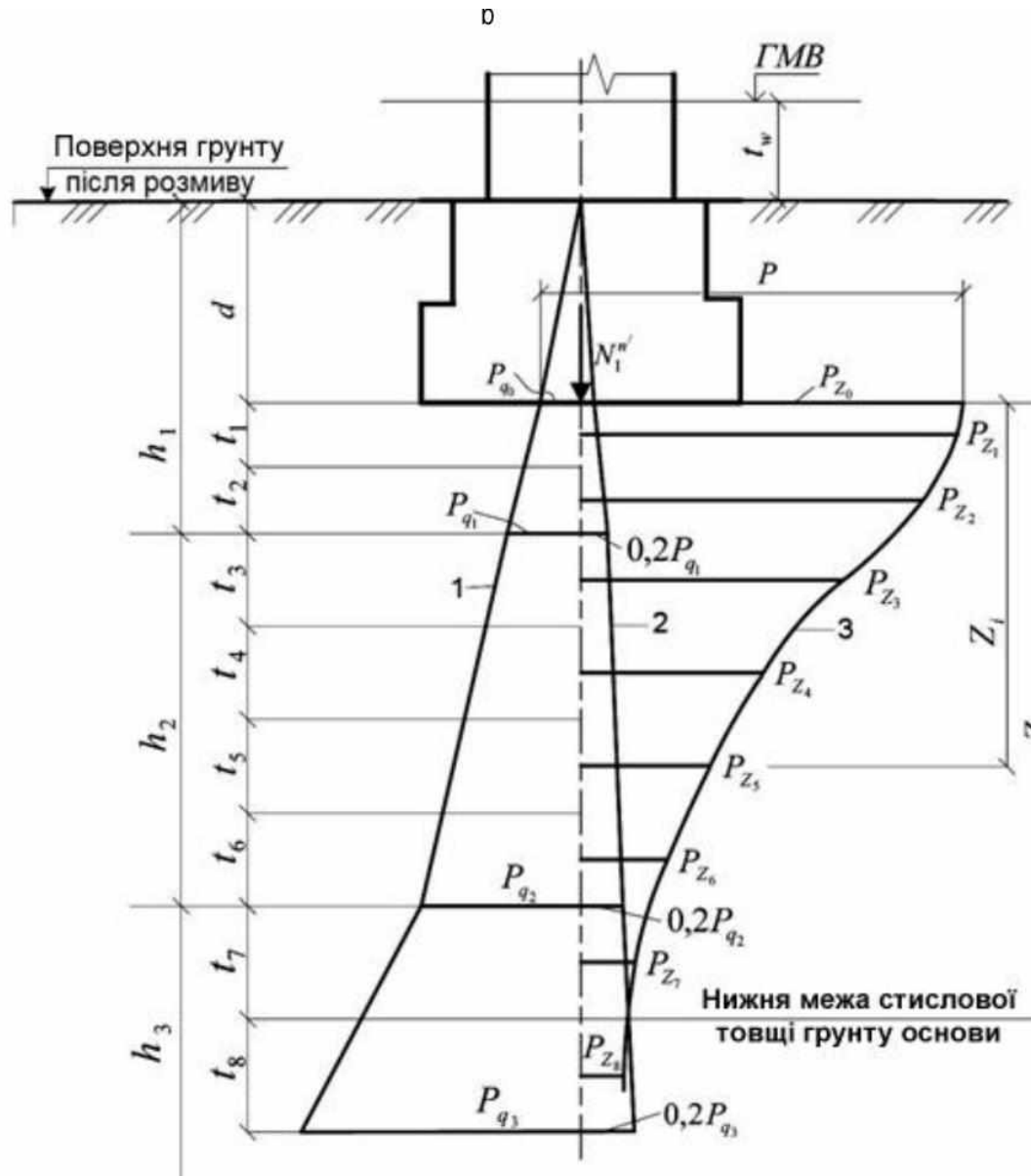


Рисунок 18.4 – Схема визначення стисливої товщі ґрунту (джерело: [6, с. 42, рис. 5.1])

8. Конструювання фундаменту

Форма фундаменту має забезпечувати передавання зусиль без надмірної концентрації напружень. Для жорстких масивних фундаментів розширення виконують уступами або похилими гранями. Гнучкі залізобетонні фундаменти працюють на згин і потребують розрахунку робочої арматури.

- підшву розміщують на підготовленій і захищеній від розуцільнення основі;
- розміри уступів узгоджують із висотою та кутом передавання стискальних зусиль;
- робочу арматуру підшви розміщують у розтягнутій зоні з необхідним захисним шаром;
- стакан або вузол сполучення з колоною має передавати N , M і Q ;
- стики, анкери та випуски арматури призначають за чинними конструктивними вимогами;
- у водонасичених ґрунтах передбачають заходи, що зберігають природну структуру основи.

9. Навчальний приклад попереднього добору

Нехай $N_{tot} = 900$ кН, а попередньо прийнятий розрахунковий опір $R = 250$ кПа.

$$A_{req} = 900 / 250 = 3,60 \text{ м}^2 \quad (18.8)$$

$$B = \sqrt{3,60} = 1,90 \text{ м} \quad (18.9)$$

Приймаємо для першого наближення квадратну підшву $2,0 \times 2,0$ м. Тоді $A = 4,0 \text{ м}^2$ і $p_{avg} = 900/4,0 = 225$ кПа. Це менше 250 кПа, однак остаточний висновок роблять після уточнення ваги фундаменту, моментів, крайових тисків, слабкого шару та осідання.

10. Послідовність навчального розрахунку

1. Зібрати навантаження N , M_x , M_y і Q на рівні обрізу фундаменту.
2. Проаналізувати інженерно-геологічний розріз і вибрати опорний шар.
3. Призначити тип і глибину закладання фундаменту.
4. Визначити попередню площу та реальні розміри підшви.
5. Уточнити власну вагу й обчислити p_{avg} , p_{max} та p_{min} .
6. Перевірити несучу здатність основи і слабкого підстильного шару.
7. Визначити осідання, різницю осідань i , за потреби, крен.
8. Виконати конструктивний розрахунок фундаменту й армування.

Типові помилки

- вибір підшви лише за N без моментів;
- розміщення підшви в слабкому або неоднорідному шарі;
- перевірка p_{avg} без p_{max} і p_{min} ;
- ігнорування слабкого шару нижче підшви;
- підміна розрахунку осідання перевіркою міцності;
- визначення арматури до встановлення реактивного тиску ґрунту.

Висновки

Розміри фундаменту мілкового закладання визначають сумісно за несучою здатністю та деформаціями основи. Попередня площа є лише першим наближенням; остаточне рішення потребує крайових тисків, осідання й конструктивного розрахунку залізобетонної частини.

Контрольні запитання

1. Коли застосовують фундаменти мілкового закладання?
2. Від чого залежить глибина підшви?
3. Як виконують попередній добір площі?
4. Чому потрібно перевіряти p_{max} і p_{min} ?
5. Коли перевіряють слабкий підстильний шар?
6. Чим відрізняється перевірка за несучою здатністю від перевірки за деформаціями?
7. Яка арматура є робочою у гнучкій підшві?

Лекція 19. Котловани та захист від підземних вод

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: визначати тип котловану, пояснювати роботу укосів і кріплення та обирати загальний спосіб захисту від підземних вод.

План

1. Призначення і розміри котловану.
2. Стійкість укосів і кріплення стінок.
3. Підземні води і водозниження.
4. Послідовність робіт та збереження ґрунту основи.

Навчальний матеріал

1. Призначення і геометрія котловану

Котлован — це виїмка, потрібна для влаштування фундаменту чи іншої підземної частини будівлі. Його глибину пов'язують із позначкою підшви, а ширину — з габаритами фундаменту, опалубки та робочих зон. Креслення котловану має показувати контур дна й верху, рівень ґрунту, шаруватість основи, відмітку підземних вод і спосіб утримання стінок. Якщо підземну частину будівлі не можна змонтувати в прийнятих розмірах котловану, геометрію уточнюють до початку робіт [6, с. 49–51].

Вище рівня підземних вод у стійкому ґрунті застосовують відкритий котлован із укосами. Сухість котловану сама по собі не доводить, що вертикальна стінка стійка. Відношення висоти укосу до його горизонтального закладення пов'язане з властивостями ґрунту, висотою виїмки та зовнішніми навантаженнями біля бровки. Навчальна схема допомагає побачити, чому широкий укіс вимагає додаткової площі майданчика і за щільної забудови часто недоступний.

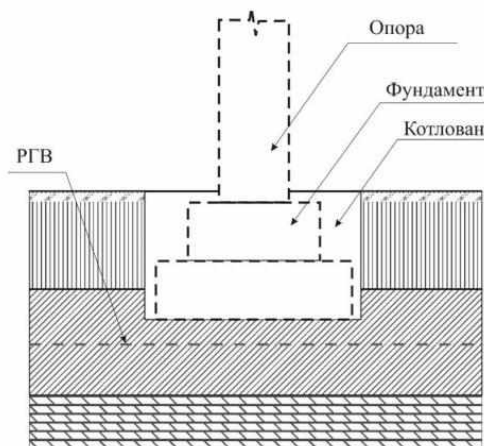


Рис. 6.2. Схема котловану з вертикальними бортами

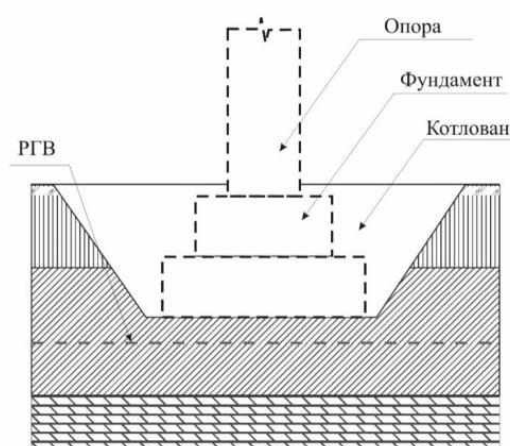


Рис. 6.3. Схема котловану з укосами

Рисунок 19.1 – Вертикальний борт і природний укіс котловану. Фрагменти рисунків 6.2 і 6.3 з посібника Тютькіна та співавторів [6, с. 50].

2. Стійкість укосів і кріплення стінок

Стійкість стінки визначається вагою та станом ґрунту, глибиною виїмки, впливом води й навантаженням поблизу бровки. Під час тривалої роботи відкритий укіс може змінити стан через дощ, промерзання або порушення шаруватості. Якщо укоси влаштувати неможливо чи небезпечно, передбачають огороження: наприклад, шпунтову стінку або іншу систему кріплення. Кріплення сприймає тиск ґрунту і води, а його схема має враховувати прилеглі будівлі та комунікації [6, с. 57–60].

Порівняння двох планів ділянки показує вибір: на вільній території ширина котловану може збільшитися за рахунок укосу; біля сусідньої будівлі або дороги вертикальна огорожена стінка дозволяє скоротити зайняту площу. Це не готовий розрахунок її стійкості: проєктне рішення потребує фактичних характеристик ґрунту, води, навантажень і перевірок за чинними нормами.

3. Вплив підземних вод та вибір способу захисту

Коли рівень підземної води вищий від дна котловану, вода надходить через укоси й дно. Вона може розмивати частинки ґрунту, ускладнювати розробку виїмки й погіршувати стан природної основи. У підручнику наведено три групи заходів: водозниження, протифільтраційні завіси та їхнє комбінування [6, с. 62–64]. Вибір залежить від водопроникності ґрунту, напору, глибини, розмірів котловану та впливу на сусідню забудову.

Відкритий водовідлив збирає воду канавками в приямок, після чого її відкачують насосом. Цей спосіб можливий лише тоді, коли потік не руйнує укоси й основу. Глибинне водозниження зменшує рівень води довкола виїмки за допомогою фільтрів або свердловин; його організовують до виконання робіт у ґрунті нижче природного рівня води. В обох випадках потрібно стежити за станом прилеглих споруд.

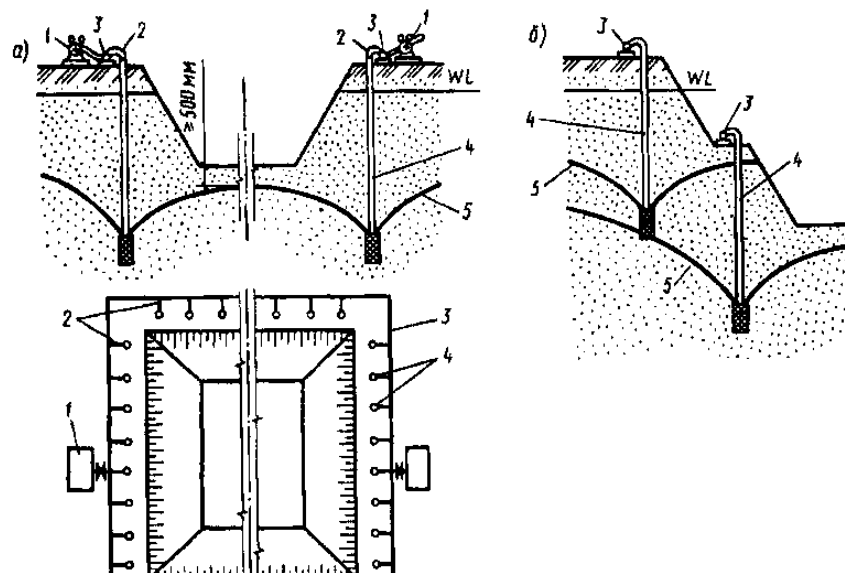


Рисунок 19.2 – Одноярусна та багаторярусна схеми глибинного водозниження. Фрагмент рисунка 8.1 з посібника Тютькіна та співавторів [6, с. 63].

4. Послідовність робіт і збереження ґрунту основи

Перед розробкою уточнюють осі фундаменту, глибину, місця складування ґрунту та шляхи руху техніки. Далі влаштовують потрібне кріплення або укоси, організовують водовідведення й поетапно розробляють ґрунт. Перед бетонуванням перевіряють, чи збережені відмітка дна та природний стан опорного шару. У навчальному прикладі студент упорядковує саме ці рішення на схемі й пояснює, в який момент потрібне огороження або водозниження.

Не допускають довгого перебування відкритого дна під дощем, затоплення, промерзання і механічного пошкодження ґрунту машинами. Посібник рекомендує залишати захисний шар під час механізованої розробки та прибирати його перед улаштуванням фундаменту [6, с. 54–55]. Після підготовки основи виконують опалубку, армування та бетонування; конкретні технологічні допуски й заходи безпеки встановлюють проєктні документи, а не цей загальний навчальний огляд.

Висновки

Котлован вибирають за конструкцією фундаменту й станом ґрунтового масиву. Зв'язок між його глибиною, укосом, кріпленням і водою слід показувати на одній схемі. Найважливіше під час робіт — забезпечити стійкість стінок і зберегти властивості ґрунту, на який фундамент передасть навантаження.

Контрольні запитання

1. Які розміри фундаменту впливають на план котловану? 2. Чому вертикальна стінка не завжди залишається стійкою? 3. Коли використовують укос, а коли потрібне кріплення? 4. Чим відрізняється відкритий водовідлив від глибинного водозниження? 5. Як захистити природну структуру ґрунту основи?

Джерело: Тютюкін та співавтори [6, с. 49–55, 57–60, 62–64]. Для заняття опрацювати с. 49–51, 57–58 і 62–63; інші наведені сторінки — для розгляду рисунків і прикладів.

Лекція 20. Проектування і розрахунок пальових фундаментів

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: сформувати розуміння роботи паль-стояків і висячих паль, навчити обирати тип палі, визначати допустиме навантаження, попередню кількість паль і пояснювати роботу пальової групи з ростверком.

План

1. Умови застосування фундаментів глибокого закладання.
2. Класифікація паль.
3. Палі-стояки та висячі палі.
4. Ростверки і компонування пальового фундаменту.
5. Несуча здатність одиночної палі.
6. Кількість і розміщення паль.
7. Перевірки пальової групи за граничними станами.

Навчальний матеріал

Джерельна основа

Джерело: Тютюкін та співавтори [6, с. 65–91]. Для заняття опрацювати с. 65–67 і 76–81; с. 83–91 — додатково для детальніших перевірок.

Схема для лекції 20 використовує розрахункові дані, відібрані в лекції 17; технологію влаштування паль розглянуто окремо в лекції 21.

1. Коли застосовують палі

Пальовий фундамент застосовують, коли верхні шари слабкі, стисливі, водонасичені або піддаються розмиву, а навантаження потрібно передати на глибші міцні шари. Палі також зменшують обсяг глибоких котлованів і можуть підвищувати стійкість споруди до горизонтальних дій.

- прорізання слабких шарів і передавання навантаження на міцний ґрунт;
- зменшення загальних і нерівномірних осідань;
- сприйняття значних вертикальних, горизонтальних і моментних дій;
- робота в умовах високого рівня ґрунтових вод;
- застосування у щільній забудові за відповідного способу влаштування.

2. Класифікація паль

За способом виготовлення палі поділяють на готові, які занурюють у ґрунт, і палі, що формують безпосередньо в свердловині. За матеріалом вони можуть бути залізобетонними, бетонними, сталевими або комбінованими. За формою перерізу — суцільними, порожнистими, квадратними, круглими та іншими.

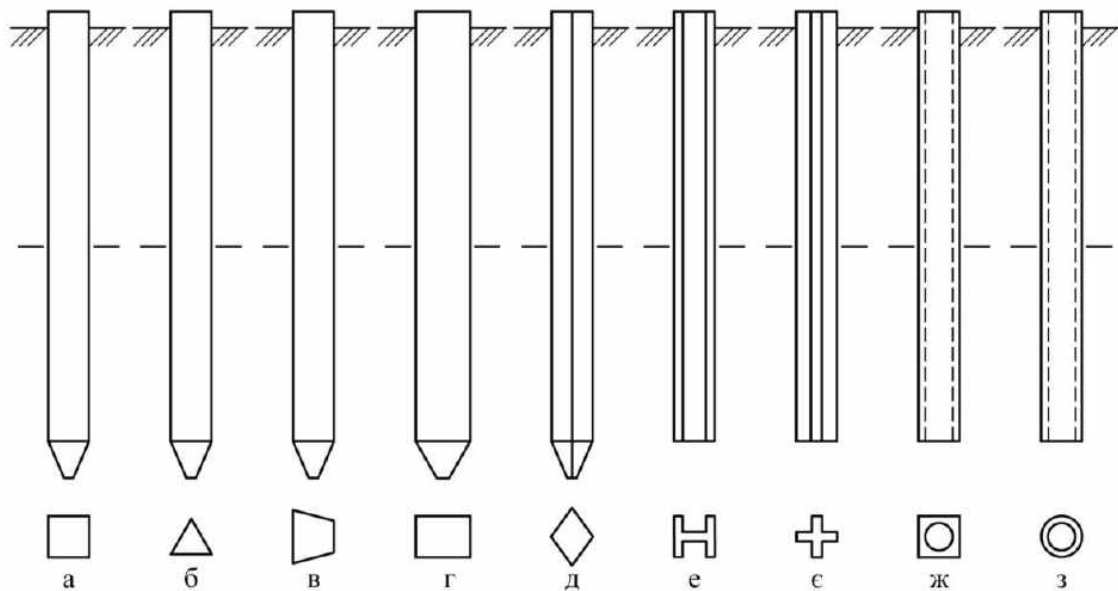


Рисунок 20.1 – Основні форми поперечного перерізу забивних палів (джерело: [6, с. 67, рис. 9.1])

Вибір способу влаштування залежить від ґрунтів, довжини палі, доступного обладнання, допустимих вібрацій і шуму, близькості існуючих будівель та необхідності контролю якості стовбура.

3. Паля-стояк і висяча паля

Паля-стояк передає основну частину навантаження нижнім кінцем на практично нестисливий або малостисливий шар. Висяча паля передає навантаження одночасно нижнім кінцем і силами тертя по бічній поверхні. Це не означає, що висяча паля «висить»: назва підкреслює відсутність жорсткого спирання на скелю або інший практично нестисливий шар.

Довжину палі визначають за геологічним розрізом. Нижній кінець має пройти слабкі шари і бути достатньо заглибленим у прийнятий опорний шар. Вибір довжини лише за конструктивними міркуваннями без геології є помилковим.

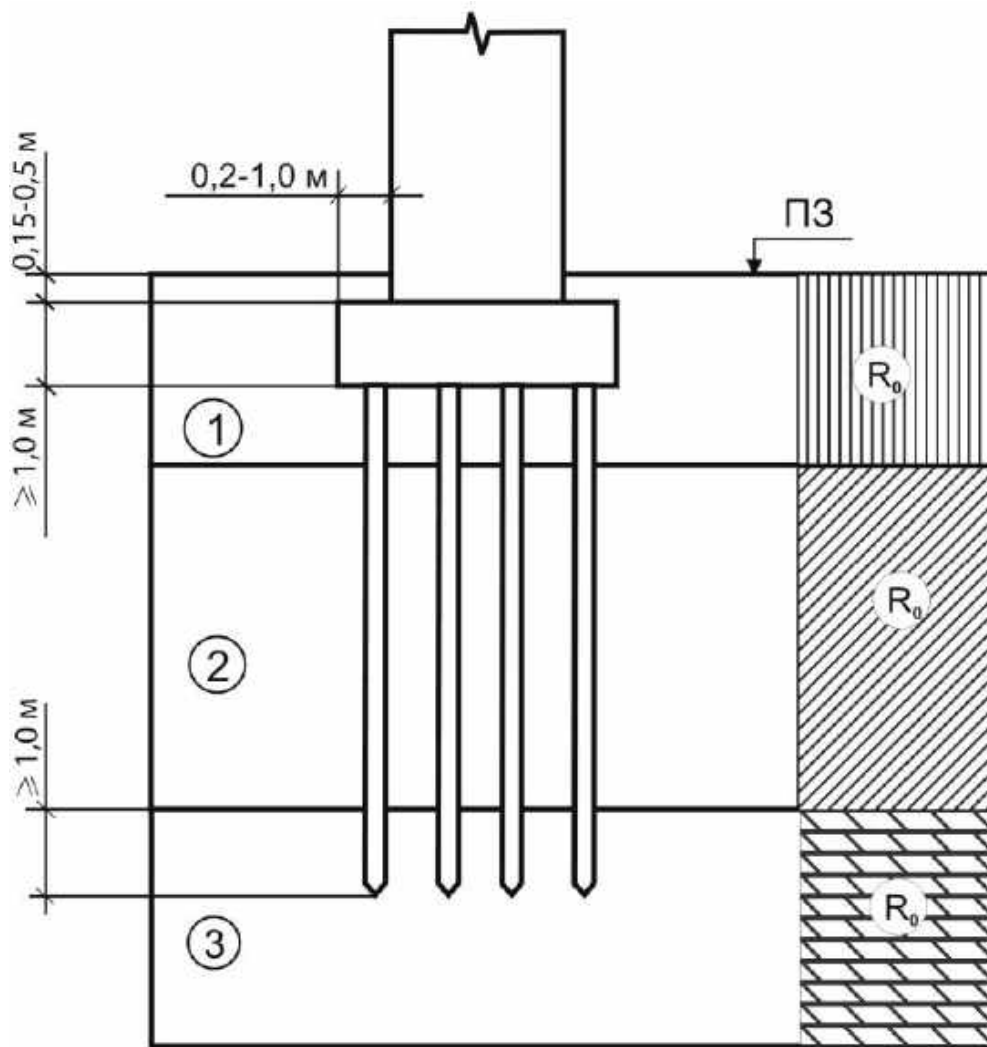


Рисунок 20.2 – Пальовий фундамент із низьким ростверком у шаруватій основі (джерело: [6, с. 72, рис. 9.6])

4. Ростверк і робота пальової групи

Ростверк об'єднує голови паль і розподіляє навантаження між ними. Низький ростверк заглиблений у ґрунт і може взаємодіяти з основою; високий розташований над поверхнею ґрунту або води. У цивільному будівництві під колони утворюють пальові кущі, під стіни — стрічкові пальові фундаменти, під важкі споруди — пальові поля.

У групі епюри напружень від сусідніх паль накладаються. Тому несуча здатність групи не завжди дорівнює простій сумі несучих здатностей одиночних паль, а осідання пальового фундаменту перевіряють як для сумісно працюючого масиву.

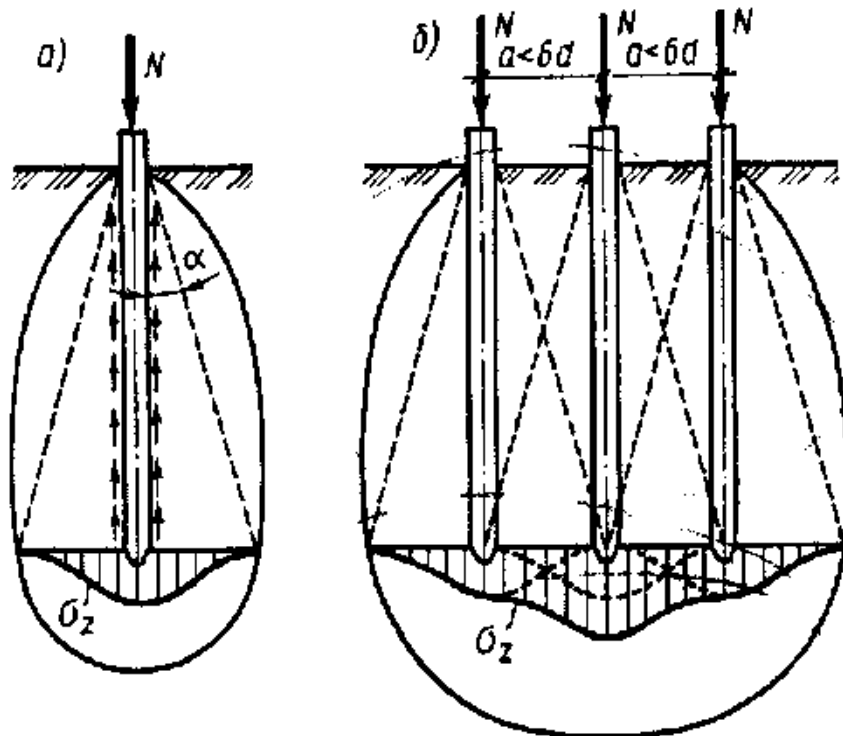


Рисунок 20.3 – Передавання навантаження одиночною палєю та групою палей (джерело: [6, с. 76, рис. 10.1])

5. Несуча здатність одиночної палі

Для палі-стояка основною є реакція ґрунту під нижнім кінцем. У спрощеному вигляді:

$$F_d = \gamma_c \cdot R \cdot A \quad (20.1)$$

де R — розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем; A — площа поперечного перерізу; γ_c — коефіцієнт умов роботи.

Для висячої палі несуча здатність складається з опору нижнього кінця та сумарного опору шарів уздовж бічної поверхні:

$$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i) \quad (20.2)$$

Тут u — периметр палі; f_i — розрахунковий опір i -го шару на бічній поверхні; h_i — товщина шару в межах палі; γ_{cR} і γ_{cf} — коефіцієнти умов роботи. Розрахункове допустиме навантаження на одну палю визначають із коефіцієнтом надійності:

$$N_{\text{allow}} \leq F_d / \gamma_k \quad (20.3)$$

6. Попередня кількість палей

Після визначення допустимого навантаження попередню кількість палей оцінюють за сумарною вертикальною дією, ураховуючи вагу ростверку та вплив горизонтальних сил і моментів:

$$n = ((\sum N + G_p) \cdot \beta) / N_{\text{allow}} \quad (20.4)$$

Результат округлюють у більший бік, після чого палі розміщують у плані та уточнюють фактичні зусилля. За наявності моменту крайні палі завантажені більше за середні.

7. Розміщення паль у ростверку

Палі розташовують рядами або у шаховому порядку, прив'язуючи сітку до осей колон і стін. У джерелі для забивних паль наведено орієнтовний інтервал між осями $3d-6d$, де d — сторона або діаметр палі. Надто мала відстань ускладнює занурення і посилює взаємний вплив паль.

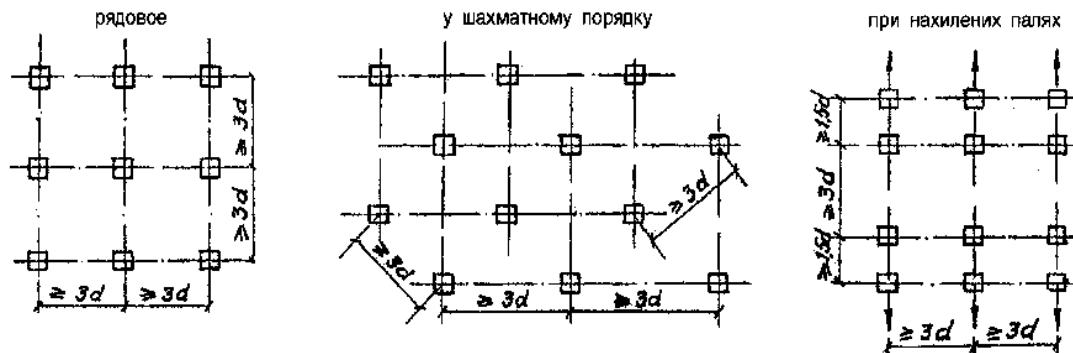


Рисунок 20.4 – Варіанти розміщення паль у площині ростверку (джерело: [6, с. 81, рис. 10.3])

Голова палі має бути надійно з'єднана з ростверком. Конструктивне рішення передає поздовжню силу, а за потреби — момент і поперечну силу. Край ростверку призначають із достатнім звисом відносно крайньої палі.

8. Перевірки пального фундаменту

- несуча здатність кожної палі за ґрунтом і матеріалом;
- максимальне й мінімальне навантаження на палі від N , M_x і M_y ;
- несуча здатність пальнової групи як умовно масивного фундаменту;
- міцність і тріщиностійкість ростверку;
- осідання, різниця осідань і крен;
- стійкість до горизонтальних навантажень;
- технологічність улаштування та контроль якості.

Для симетричної групи середнє навантаження на палю N/n . При дії моментів крайові зусилля визначають розподілом відносно осей пального поля; має виконуватися умова, що найбільш завантажена паля не перевищує допустиме навантаження, а мінімальне зусилля не суперечить прийнятій роботі палі.

9. Навчальний приклад

Нехай за ґрунтом $F_d = 1100$ кН, $\gamma_k = 1,4$. Тоді допустиме навантаження:

$$N_{\text{allow}} = 1100 / 1,4 = 785,7 \text{ кН} \quad (20.5)$$

За сумарного вертикального навантаження разом із ростверком 3150 кН і $\beta = 1,10$:

$$n = 3150 \cdot 1,10 / 785,7 = 4,41 \quad (20.6)$$

Попередньо приймають 5 паль. Після компоновання ростверку обов'язково перевіряють крайові зусилля від моментів, відстані між палями, міцність ростверку та осідання групи.

10. Послідовність навчального розрахунку

1. Проаналізувати геологічний розріз і визначити слабкі та опорні шари.
2. Вибрати тип, переріз, спосіб улаштування і попередню довжину палі.
3. Визначити несучу здатність одиночної палі та допустиме навантаження.

4. Обчислити попередню кількість паль.
5. Скомпонувати палі в ростверку й призначити його розміри.
6. Розподілити N і моменти між палями та перевірити крайові зусилля.
7. Перевірити фундамент як умовно масивний і розрахувати деформації.
8. Виконати конструктивний розрахунок ростверку й вузлів з'єднання.

Типові помилки

- вибір довжини палі без геологічного розрізу;
- змішування несучої здатності F_d і допустимого навантаження N_{allow} ;
- ігнорування моментів і нерівномірного завантаження паль;
- надто щільне розміщення паль;
- відсутність перевірки групи за осіданням;
- прийняття кількості паль без конструктивного компонування ростверку.

Висновки

Пальовий фундамент є системою «палі — ростверк — ґрунт». Обґрунтований розрахунок починається з геології, охоплює одиночну палю, розподіл зусиль у групі, роботу умовного масиву та деформації.

Контрольні запитання

1. Коли доцільно застосовувати пальовий фундамент?
2. Чим паля-стояк відрізняється від висячої палі?
3. З яких складових формується F_d висячої палі?
4. Для чого потрібний ростверк?
5. Як визначають попередню кількість паль?
6. Чому крайові палі можуть бути завантажені більше?
7. Навіщо перевіряти палюву групу як умовно масивний фундамент?

Лекція 21. Спорудження пальових фундаментів

Тривалість: 2 академічні години.

Мета: пояснювати етапи улаштування готових і буронабивних паль, контролювати виконання робіт і зв'язок паль з ростверком.

План

1. Вибір способу спорудження.
2. Занурення готових паль.
3. Виготовлення буронабивних паль.
4. Улаштування ростверку й контроль якості.
5. Навчальна послідовність робіт.

Навчальний матеріал

1. Вибір способу спорудження

Спосіб спорудження пальового фундаменту залежить від геологічного розрізу, рівня підземних вод, прийнятого типу та довжини паль, доступу техніки й чутливості сусідніх будівель до шуму та вібрацій. Палі можуть виготовлятися заздалегідь і занурюватися в ґрунт або формуватися безпосередньо в свердловині. Перед технологічним вибором потрібно мати схему розміщення паль, позначки ростверку, робочий простір, місця складування та порядок виконання робіт [6, с. 94–99].

Паля-стояк та висяча паля відрізняються механізмом передавання зусилля, але спосіб виготовлення не визначає цей механізм автоматично. Наприклад, буронабивну або забивну палю проєктують разом із ґрунтовими умовами. У цій лекції розглядають організацію та послідовність спорудження; розрахунок несучої здатності й кількості паль подано в лекції 20.

2. Занурення готових паль

Готові палі можна забивати, віброзанурювати або вдавлювати. За ударного способу копери утримують палю в заданому положенні, а молот передає удари через її наголовник. Під час роботи контролюють розбивочні осі, положення палі на старті та зміну її положення в процесі занурення. Посібник описує механічні та дизельні молоти, віброзанурення й вдавлювання [6, с. 94–97]. Конкретний режим задають проєктом виконання робіт і характеристиками обладнання.

Поблизу наявних будівель динамічний вплив може бути істотним, тому вибір обладнання пов'язують із допустимими коливаннями і контролем стану сусідніх конструкцій. Якщо паля зупиняється раніше розрахункової позначки або її положення відхиляється від осі, слід з'ясувати причину; однією лише фіксацією відхилення якості фундаменту не підтверджується. Результати занурення й фактичні позначки відображають у виконавчій документації.

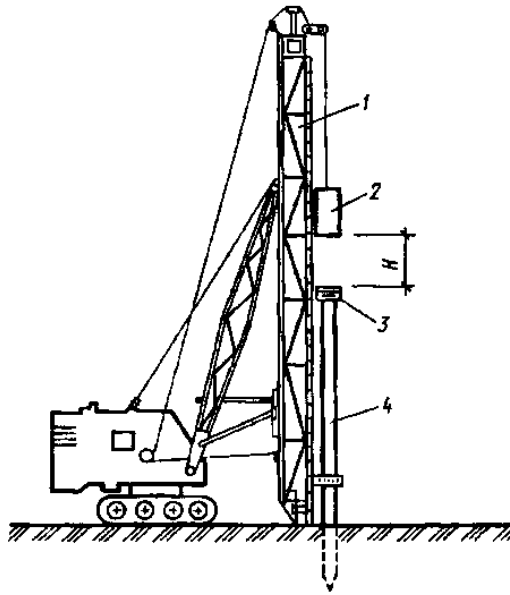


Рис. 13.1. Копер для забивання паль

Рисунок 21.1 – Копер для забивання готової палі. Фрагмент рисунка 13.1 з посібника Тютькіна та співавторів [6, с. 95].

3. Виготовлення буронабивних паль у ґрунті

Буронабивну палю створюють послідовно: улаштовують свердловину, забезпечують стійкість її стінок, за потреби встановлюють арматурний каркас і заповнюють стовбур бетоном. У сухому стійкому ґрунті кріплення стінок може не знадобитися. За інших умов застосовують обсадні труби чи інші передбачені проектом технологічні рішення. Основне завдання — не допустити обсипання ґрунту, забруднення бетону та перерв, які погіршують цілісність стовбура [6, с. 98–99].

Відсутність ударів є перевагою такої технології біля чутливої забудови. Водночас готовий стовбур прихований у ґрунті, отже якість кожної операції потрібно контролювати під час виконання, а не тільки за виглядом ростверку. У конспекті не встановлюються вимоги до складу бетону або часу витримування: їх задають проект і відповідні технологічні документи.

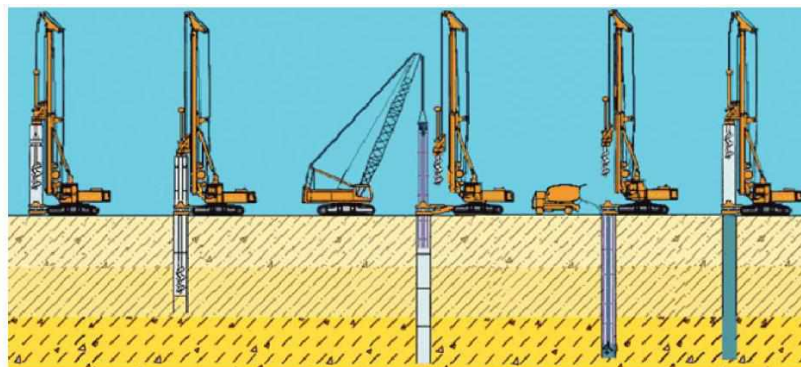


Рис. 13.6. Виготовлення буронабивних паль

Рисунок 21.2 – Послідовні стадії виготовлення буронабивних паль. Фрагмент рисунка 13.6 з посібника Тютькіна та співавторів [6, с. 99].

4. Ростверк і контроль послідовності виконання

Після улаштування паль підготовляють їхні голови, перевіряють фактичне розміщення та створюють зв'язок з ростверком за прийнятим конструктивним рішенням. Армування і бетонування ростверку виконують після того, як забезпечено проєктні позначки й відкрито потрібні випуски арматури. Не можна замінити перевірку паль перевіркою одного ростверку: кожна паля має передати на нього відповідне зусилля і прийняти навантаження від нього [6, с. 101–105].

На суходолі підготовчі роботи охоплюють планування майданчика й під'їзди для техніки. У водних умовах додаються заходи для влаштування робочої платформи, огороження або тимчасових конструкцій; посібник докладно показує такі схеми на прикладі мостових опор [6, с. 106–110]. Для звичайної будівлі студенту достатньо зрозуміти спільні етапи й пояснити, які дії забезпечують точність положення, цілісність паль та якість зв'язку з ростверком.

5. Навчальна ситуація та підсумок

На ділянці зі слабкими верхніми ґрунтами проєкт передбачає групу паль під колонним ростверком. Студент складає послідовність: отримати схему паль і геологічний розріз, підготувати майданчик, вибрати спосіб улаштування, розбити осі, улаштувати й проконтролювати палі, підготувати їхні голови, змонтувати арматуру та забетонувати ростверк. Для кожного кроку потрібно назвати хоча б одну умову якості, яку можна перевірити на місці.

Лекція завершує фундаментний блок: у лекції 17 обирають тип фундаменту й вихідні дані, у лекції 18 розглядають мілке закладання, у лекції 19 — котлован і воду, у лекції 20 — палі як розрахункову систему, а в цій лекції — технологічну послідовність реалізації прийнятого рішення. Такий порядок відповідає новій програмі й не вимагає від студента виконувати повний технологічний проєкт.

Контрольні запитання

1. Які чинники визначають вибір способу улаштування паль?
2. Які основні етапи занурення готової палі?
3. Чим відрізняється послідовність виготовлення буронабивної палі?
4. Що контролюють до бетонування ростверку?
5. Чому в міських умовах потрібно враховувати вплив технології на сусідні будівлі?