

ВИКОРИСТАННЯ ДВОЛІНІЙНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДЕФОРМАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

У статті наведено методику розрахунку залізобетонних конструкцій за спрощеною діаграмою деформування бетону. Приведено алгоритми розрахунку несучої здатності нормальних прямокутних і таврових перерізів, підбору армування елементів, що працюють на позакентровий та центральний стиск.

The paper presents the procedure for designing the reinforced concrete structures according to the concrete deformation simplified diagram. The algorithms for the bearing capacity calculation for normal rectangular and T cross-sections and for the reinforcement selection for elements working in eccentric and axial compressions are given.

Як відомо, з 2011 року в Україні при розрахунках залізобетонних конструкцій використовуються державні стандарти, що базуються на деформаційній методиці розгляду напружено-деформованого стану перерізів [1,2]. Деформаційна методика розрахунку передбачає використання діаграм деформування матеріалів. Стосовно бетону – це діаграма короткотривалого осьового навантаження у вигляді поліному 5-го ступеня (формула 3.5 [1]). В той же час (п.3.1.6 [1]), при виконанні перевірочних розрахунків або близьких до них припускається використовувати спрощену дволінійну діаграму деформування бетону (рис.1).

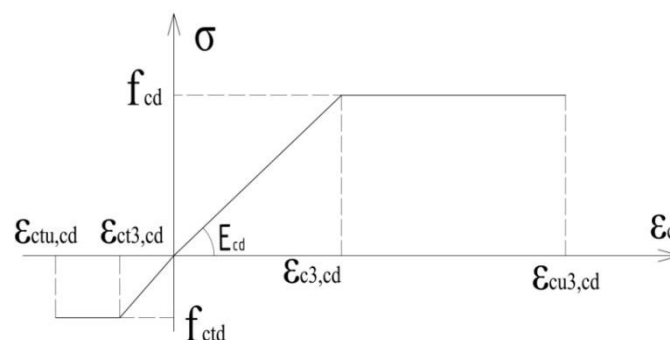


Рисунок 1 – Дволінійна залежність напруження-деформації бетону

В нормах проектування залізобетонних конструкцій [2] в додатку А наведено алгоритм розв'язання системи нелінійних рівнянь рівноваги залізобетонного розрахункового перерізу за деформаційним методом. В ньому показана реалізація даного методу з використанням діаграми деформування у вигляді поліному. Подібного алгоритму розв'язання задачі у випадку використання дволінійної діаграми деформування бетону, на жаль, немає.

В той же час, при вирішенні великого спектру задач практичного проектування залізобетонних конструкцій існує потреба у наявності простих, доступних для розв'язання без використання великих програмних комплексів, розрахункових апаратів, в основу яких може бути покладена дволінійна діаграма деформування бетону.

Важко переоцінити наявність такого розрахункового апарату у використанні в учбовому процесі при навчанні інженерів-проектувальників. Простота у використанні цього апарату при розгляді напружено-деформованого стану залізобетонного перерізу дозволить зрозуміти етапи роботи конструкції під дією навантаження; оцінити ефективність використання арматури в розтягнутій та стиснутій зонах залізобетону; зрозуміти основи раціонального проектування конструкцій.

В подальшому наведено результати напрацювань, виконані на кафедрі промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету та у відділі надійності конструкцій будівель і споруд державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій для перерізів, що найбільш часто використовуються в практиці проектування (рис.2).

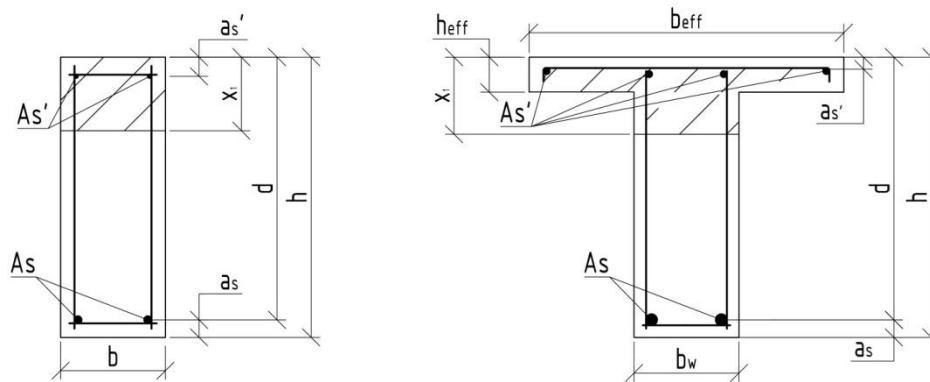


Рисунок 2 – Геометричні характеристики нормального прямокутного (а) та таврового (б) перерізів

Крім простоти та доступності, запропонована методика передбачає використання відомої методології розв'язання задачі розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням характерних випадків руйнування нормальних перерізів та умов раціонального проектування [3].

Приймається, що нормальний переріз може зруйнуватись по двом характерним випадкам. Перший характерний випадок відбувається при руйнуванні стиснутого бетону та наявності текучості в розтягнутій арматурі. Другий – руйнуванні стиснутого бетону при пружній роботі розтягнутої арматури.

Підбір робочого армування балкових елементів виконується з умови раціонального проектування, тобто шляхом реалізації повної діаграми роботи бетону в стиснутій зоні та досягненні границі пружної роботи в розтягнутій арматурі.

Якщо при пружних деформаціях в розтягнутій арматурі деформації в бетоні стиснутої зони сягають граничних значень, необхідно передбачати розташування робочої арматури в стиснутій зоні бетону. Площа стиснутої арматури призначається з умови одночасного руйнування стиснутого бетону та наявності текучості в розтягнутій арматурі.

Автори щиро вдячні професору Барашикову А.Я. за методичну допомогу та консультації, щодо використання спрощених діаграм деформування бетону при розрахунках залізобетонних конструкцій.

Шляхи реалізації такого підходу наведено нижче.

1. Алгоритм визначення несучої здатності нормальних перерізів балкових елементів з одиночним армуванням

При рішенні цієї задачі основна невизначеність полягає у знаходженні характерного типу руйнування. Вона вирішується шляхом порівняння робочої висоти стиснутої зони бетону x_1 з граничним значенням цієї величини x_{1r} . Остання знаходиться з розгляду напружено-деформованого стану нормального перерізу, при якому виконується умова

$$\begin{cases} \varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu3,cd} \\ \varepsilon_s = \varepsilon_{so} \end{cases}.$$

Алгоритм розрахунку наступний.

1.1 Визначають величини: робочу висоту перерізу d (м); розрахункову міцність арматури $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ (МПа); деформації арматури на грані пружної роботи $\varepsilon_{so} = \frac{f_{yd}}{E_s}$; та коефіцієнти - $\lambda = \frac{\varepsilon_{cu3,cd} - \varepsilon_{c3,cd}}{\varepsilon_{cu3,cd}}$; $k_\lambda = \frac{1 + \lambda(1 + \lambda)}{3(1 + \lambda)}$.

1.2 Визначають усереднене значення розподілених внутрішніх зусиль в стиснутій зоні бетону $q_c = \frac{1}{2} f_{cd} b (1 + \lambda)$ (кН/м).

1.3 Знаходять контрольне значення висоти стиснутої зони бетону $x_{1r} = d \frac{\varepsilon_{cu3,cd}}{\varepsilon_{cu3,cd} + \varepsilon_{so}}$ (м).

1.4 Обчислюють висоту стиснутої зони бетону з умови початку текучості арматури $x_1 = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{q_c}$ (м).

1.5 Визначають характерний випадок руйнування.

Якщо виконується умова $x_{1r} \geq x_1$, роблять висновок, що маємо справу з 1-им характерним випадком руйнування – в момент руйнування бетону в розтягнутій арматурі виникає текучість і йдуть до п.1.6.

Якщо виконується умова $x_{1r} < x_1$, роблять висновок, що маємо справу з 2-им характерним випадком руйнування – в момент руйнування бетону розтягнута арматура працює пружно і йдуть до п.1.8.

1.6 Знаходять деформації розтягнутої арматури $\varepsilon_s = \varepsilon_{cu3,cd} \left(\frac{d}{x_1} - 1 \right)$.

1.7 Перевіряють умову непружної роботи розтягнутої арматури $\varepsilon_{ud} > \varepsilon_s > \varepsilon_{s0}$, тобто те, що арматура працює в пластичній стадії, але не руйнується, та йдуть до п.1.11.

1.8 Визначають значення дискримінанта $D_1 = \varepsilon_{cu3,cd} E_s A_s (\varepsilon_{cu3,cd} E_s A_s + 4q_c d)$.

1.9 Обчислюють висоту стиснутої зони бетону $x_1 = \frac{-\varepsilon_{cu3,cd} E_s A_s + \sqrt{D_1}}{2q_c}$.

1.10 Обчислюють несучу здатність перерізу $M_u = x_1 \cdot q_c (d - x_1 \cdot k_\lambda)$ (кН·м).

1.11 Перевіряють умову забезпечення несучої здатності $M_{Ed} \leq M_u$, де M_{Ed} – розрахунковий момент в перерізі від зовнішніх навантажень.

2. Алгоритм визначення несучої здатності нормальних перерізів балкових елементів з подвійним армуванням

При рішенні цієї задачі, як і в попередній, основна невизначеність полягає у знаходженні характерного типу руйнування. Крім того, для кожного характерного типу руйнування може виникати два різних підваріанта роботи стиснутої арматури – вона може працювати або пружно, або на стадії текучості.

Тому спочатку визначаємо характерний тип руйнування нормального перерізу шляхом порівняння робочої висоти стиснутої зони бетону x_1 з граничним значенням цієї величини x_{1r} . Остання знаходиться з розгляду

напружено-деформованого стану нормального перерізу, при якому реалізується умова

$$\begin{cases} \varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu3,cd} \\ \varepsilon_s = \varepsilon_{s0} \end{cases} .$$

В разі, коли реалізується 1-й характерний тип руйнування, визначення стадії роботи стиснутої арматури відбувається шляхом порівняння висоти стиснутої зони бетону x_1 із контрольним значенням x_{1r} , величина якої розраховується із розгляду напружено-деформованого стану перерізу при одночасному виконанні умов:

$$\begin{cases} \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{ud}, \\ \sigma_s = f_{yd} \end{cases} \quad \text{та} \quad \begin{cases} \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon'_s < \varepsilon_{ud}, \\ \sigma'_s = f_{yd} \end{cases} .$$

При реалізації 2-го характерного типу руйнування, стадію роботи стиснутої арматури визначають порівнянням деформацій на грані пружної роботи стиснутої арматури ε_{s0}' з контрольним значенням цих деформацій ε_{sr}' . Контрольне значення величини деформацій в стиснутій арматурі ε_{sr}' знаходиться із розгляду напружено-деформованого стану перерізу, при якому висота стиснутої зони бетону $x_1 = x_{1r}$.

Алгоритм розрахунку наступний .

2.1 З відповідних таблиць [1], [2] та [3] виписують фізико-механічні характеристики матеріалів: для бетону – f_{cd} , МПа; $\varepsilon_{cu3,cd}$, $\varepsilon_{c3,cd}$; для арматури – f_{yk} , МПа; f_{yk}' , МПа; E_s , МПа, E_s' , МПа; γ_s ; γ_s' ; A_s , см²; A_s' , см²; ε_{ud} .

2.2 Розраховують величини:

– розрахункову міцність арматури в розтягнутій $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ (МПа) та стиснутій зоні бетону $f_{yd}' = \frac{f_{yk}'}{\gamma_s'}$ (МПа);

– деформації на грані пружної роботи розтягнутої $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$ та стиснутої

арматури $\varepsilon_{s0}' = \frac{f_{yd}'}{E_s}$;

– робочу висоту перерізу d (м);

– коефіцієнти $\lambda = \frac{\varepsilon_{cu3,cd} - \varepsilon_{c3,cd}}{\varepsilon_{cu3,cd}}$ та $k_\lambda = \frac{1 + \lambda(1 + \lambda)}{3(1 + \lambda)}$.

2.3 Визначають усереднене значення внутрішніх розподілених напружень в стиснутій зоні бетону $q_c = \frac{1}{2} f_{cd} \cdot b(1 + \lambda)$.

2.4 Визначають висоту стиснутої зони бетону з умови наявності текучості і в розтягнутій, і в стиснутій арматурі $x_{1r} = \frac{f_{yd} \cdot A_s - f_{yd}' \cdot A_s'}{q_c}$.

2.5 Розраховують контрольне значення висоти стиснутої зони бетону для визначення характерного типу руйнування $x_{1r} = d \frac{\varepsilon_{cu3,cd}}{\varepsilon_{cu3,cd} + \varepsilon_{so}}$.

2.6 Визначають характерний тип руйнування нормального перерізу.

Якщо виконується умова $x_{1r} \geq x_1$, роблять висновок, що переріз зруйнується відповідно до 1-го характерного типу, тобто в момент руйнування розтягнута арматура буде працювати в стадії текучості і йдуть до пункту 2. 7.

Якщо виконується умова $x_{1r} < x_1$, роблять висновок, що переріз зруйнується відповідно до 2-го характерного типу, тобто в момент руйнування розтягнута арматура буде працювати пружно і йдуть до пункту 2.17.

2.7 Розраховують контрольне значення висоти стиснутої зони для визначення стадії роботи стиснутої арматури в момент руйнування

$$x_{1r}' = a_s' \frac{\varepsilon_{cu3,cd}}{\varepsilon_{cu3,cd} - \varepsilon_{so}'}$$

2.8 Визначають стадію роботи стиснутої арматури при першому характерному типі руйнування.

Якщо виконується умова $x_1 \geq x_{1r}'$, роблять висновок, що буде відбуватись характерний тип руйнування 1.1, тобто в момент руйнування і розтягнута, і стиснута арматура працює в стадії текучості, і йдуть до пункту 2.9.

Якщо виконується умова $x_1 < x_{1r}'$, роблять висновок, що буде відбуватись руйнування за характерним типом 1.2, тобто розтягнута арматура буде працювати на стадії текучості, а стиснута арматура – пружно, і йдуть до пункту 2.13.

2.9 Визначають зусилля в стиснутій арматурі $F_s' = \sigma_s' \cdot E_s = f_{yd}' \cdot A_s$.

2.10. Обчислюють висоту стиснутої зони бетону $x_1 = \frac{f_{yd}' \cdot A_s - f_{yd}' \cdot A_s'}{q_c}$.

2.11. Визначають несучу здатність перерізу M_u за формулою $M_u = q_c \cdot x_1 (d - k_\lambda \cdot x_1) + F_s' (d - a_s')$.

2.12 Перевіряючи умову $M_{Ed} \leq M_u$, визначаються щодо забезпечення несучої здатності нормального перерізу та стадії роботи розтягнутої та стиснутої арматури в момент руйнування.

2.13 Визначають значення дискримінанта

$$D_{2.1} = (f_{yd}' \cdot A_s - \varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s \cdot A_s')^2 + 4 \cdot q_c \cdot \varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s \cdot A_s' \cdot a_s'$$

2.14 Розраховують висоту стиснутої зони бетону

$$x_1 = \frac{f_{yd}' \cdot A_s - \varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s \cdot A_s' + \sqrt{D_{2.1}}}{2 \cdot q_c}$$

2.15 Визначають зусилля в стиснутій арматурі $F_s' = \varepsilon_{cu3,cd} \left(1 - \frac{a_s'}{x_1}\right) E_s \cdot A_s'$.

2.16 Послідовно виконують п.п.2.11 та 2.12.

2.17 Визначають контрольне значення деформацій в стиснутій арматурі ε_{sr}' , при якому відбувається другий тип характерного руйнування

$$\varepsilon_{sr}' = \varepsilon_{cu3,cd} \left(1 - \frac{a_s'}{x_{1r}'}\right),$$

2.18 Визначають стадію роботи стиснутої арматури при другому характерному типі руйнування (розтягнута арматура працює пружно).

Якщо виконується умова $\varepsilon_{s0}' \leq \varepsilon_{sr}' < \varepsilon_{ud}$, роблять висновок, що відбувається характерний тип руйнування 2.1, тобто в стиснутій арматурі виникає текучість, йдуть до пункту 2.19.

Якщо виконується умова $0 < \varepsilon_{sr}' < \varepsilon_{s0}'$, роблять висновок, що відбувається характерний тип руйнування 2.2, а саме, в момент руйнування стиснутого бетону як розтягнута, так і стиснута арматура буде працювати пружно, і йдуть до пункту 2.23.

2.19 Розраховують дискримінант

$$D_{2.2} = \left(\varepsilon_{cu3,cd} E_s A_s - f_{yd}' A_s' \right)^2 + 4q_c \varepsilon_{cu3,cd} E_s A_s d.$$

2.20 Визначають висоту стиснутої зони бетону

$$x_1 = \frac{f_{yd}' \cdot A_s' - \varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s \cdot A_s + \sqrt{D_{2.2}}}{2 \cdot q_c}.$$

2.21 Розраховують величину зусиль в стиснутій зоні бетону $F_s' = f_{yd}' \cdot A_s'$.

2.22 Послідовно виконують п.п.2.11 та 2.12.

2.23 Розраховують дискримінант

$$D_{2.3} = \varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s \left[\varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s (A_s + A_s')^2 + 4 \cdot q_c (d \cdot A_s + a_s' \cdot A_s') \right].$$

2.24 Визначають висоту стиснутої зони бетону

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{cu3,cd} \cdot E_s (A_s + A_s') - \sqrt{D_{2.3}}}{-2 \cdot q_c}.$$

2.25 Розраховують величину зусиль в арматурі стиснутої зони бетону

$$F_s' = \varepsilon_{cu3,cd} \left(1 - \frac{a_s'}{x_1} \right) E_s \cdot A_s'.$$

2.26 Послідовно виконують п.п.2.11 та 2.12.

3.Визначення площі робочої повздожньої арматури балок прямокутного перерізу із умов раціонального проектування

Суть рішення цієї задачі полягає у підборі площі робочої повздожньої арматури балки при заданих геометричних розмірах перерізу ($b \times h$), проектному класі бетону та арматури і відомій величині зовнішнього розрахункового моменту M_{Ed} .

Основна невизначеність задачі – знаходження критерію необхідності розташування одиночного чи подвійного армування. Задача вирішується шляхом порівняння граничної висоти стиснутої зони бетону x_{lr} з таким значенням висоти x_1 , яке б залежало від величини розрахункового зовнішнього моменту M_{Ed} .

Гранична висота стиснутої зони x_{lr} знаходиться з умови того, щоб в момент руйнування стиснутого бетону в робочій повздожній арматурі виникала текучість.

Висота стиснутої зони бетону x_1 , що залежить від величини діючого в перерізі моменту зовнішніх сил M_{Ed} може бути визначена із розгляду напружено-деформованого стану перерізу з умови рівноваги у вигляді суми моментів відносно центру ваги розтягнутої арматури.

Сам алгоритм розрахунку має наступний вигляд.

3.1 Виписують фізико-механічні характеристики матеріалів: для бетону –

f_{cd}^T , $\epsilon_{cu3,cd}$, $\epsilon_{c3,cd}$, $f_{cd} = f_{cd}^T \cdot \gamma_{cl}$; для розтягнутої – f_{yk} , E_s , γ_s , ϵ_{ud} , $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$; теж

для стиснутої арматури – f_{yk}' , E_s , γ_s' , ϵ_{ud} , $f_{yd}' = \frac{f_{yk}'}{\gamma_s'}$.

3.2 Аналогічно із попередніми задачами визначають робочу висоту перерізу d ; граничні деформації пружності стиснутої ϵ_{so}' та розтягнутої ϵ_{so} арматури; коефіцієнти λ та k_λ ; усереднене значення розподілених внутрішніх зусиль в стиснутому бетоні q_c .

3.3 Визначають граничне значення висоти стиснутої зони бетону

$$x_{1r} = d \frac{\varepsilon_{cu3.cd}}{\varepsilon_{cu3.cd} + \varepsilon_{so}} .$$

3.4 Визначають величину дискримінанта D_3 по формулі

$$D_3 = d^2 q_c^2 - 4k_\lambda q_c M_{Ed} .$$

3.5 Визначають висоту стиснутої зони бетону $x_1 = \frac{dq_c - \sqrt{D_3}}{2k_\lambda q_c} .$

3.6 Перевіряють умову необхідності розташування арматури в стиснутій зоні бетону.

Якщо виконується умова $x_1 < x_{1r}$, роблять висновок, що з умов раціонального проектування необхідне армування тільки в розтягнутій зоні і йдуть до п.3.6.

Якщо виконується умова $x_1 \geq x_{1r}$, роблять висновок про необхідність подвійного армування і йдуть до п.3.8.

3.7 Визначають робоче армування в розтягнутій зоні бетону $A_s = \frac{q_c x_1}{f_{yd}} .$

3.8 По таблицям підбирають кількість та діаметр стержнів необхідного класу.

3.9 Знаходять деформації в стиснутій арматурі $\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu3.cd} \frac{x_{1r} - a_s'}{x_{1r}} .$

3.10 Визначають, в якій стадії працює стиснута арматура і значення напружень σ_s' .

Якщо виконується умова $0 < \varepsilon_s' < \varepsilon_{s0}'$, роблять висновок, що стиснута арматура працює пружно і $\sigma_s' = \varepsilon_s' E_s$, .

Якщо виконується умова $\varepsilon_{s0}' \leq \varepsilon_s' < \varepsilon_{ud}'$, роблять висновок, що в стиснутій арматурі буде виникати текучість і $\sigma_s' = f_{yd}' .$

3.11 Знаходять необхідну площу стиснутої арматури

$$A'_s = \frac{M_{Ed} - q_c x_{1r} (d - k_\lambda x_{1r})}{\sigma'_s (d - a'_s)}$$

3.12 Знаходять необхідну площу розтягнутої арматури $A_s = \frac{q_c x_{1r} + \sigma'_s A'_s}{f_{yd}}$.

3.13 По таблицям підбирають кількість та діаметр арматури в розтягнутій та стиснутій зонах бетону.

4. Розрахунок робочого повздовжнього армування балок таврового перерізу

Крім невизначеностей попередніх задач, в цій має бути попередньо знайдено положення нейтральної осі. Визначення положення нейтральної осі в межах розрахункового перерізу вирішується шляхом порівняння величини контрольного значення моменту M_f з діючим розрахунковим значенням моменту зовнішніх сил M_{Ed} . Контрольне значення моменту знаходиться із розгляду напружено-деформованого стану перерізу при знаходженні нейтральної осі на межі верхньої полицки та ребра.

Коли нейтральна вісь знаходиться в межах полицки, використовуються напрацювання п.3 з урахуванням, що $b = b'_f$.

В разі проходження нейтральної вісі в межах ребра, можливі два варіанта розташування епюри стиснутого бетону: коли пружні деформації стиску бетону знаходяться і в полицці, і в ребрі; коли ці пружні деформації знаходяться тільки в ребрі. Критерієм, що використовується для визначення того чи іншого випадку є момент M_{f1} , при якому непружні деформації стиснутого бетону знаходяться виключно в полицці. Тобто, коли $\lambda x_1 = h_{eff}$.

Алгоритм розрахунку наступний.

4.1 Виписують фізико-механічні характеристики матеріалів: для бетону – f_{cd}^T , $\varepsilon_{cu3,cd}$, $\varepsilon_{c3,cd}$, $f_{cd} = f_{cd}^T \cdot \gamma_{cl}$; для арматури розтягнутої – f_{yk} , E_s , γ_s , ε_{ud} , $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$; та стиснутої – f_{yk}' , E_s' , γ_s' , ε_{ud}' , $f_{yd}' = \frac{f_{yk}'}{\gamma_s'}$.

4.2 Визначають співвідношення висоти полицки до загальної висоти перерізу ($\frac{h_{eff}}{h}$).

4.3 Визначають розрахункове значення ширини полицки b_f' :

якщо $\frac{h_{eff}}{h} \geq 0,1$, то $b_f' = b_w + 12h_{eff}$;

якщо $0,05 \leq \frac{h_{eff}}{h} < 0,1$, то $b_f' = b_w + 6h_{eff}$;

якщо $\frac{h_{eff}}{h} < 0,05$, то $b_f' = b_w$.

4.4 Як і в попередніх задачах, визначають наступні значення: робочу висоту перерізу d ; граничні деформації пружності стиснутої ε_{so}' та розтягнутої ε_{so} арматури; коефіцієнти λ та k_λ .

4.5 Визначають усереднене значення розподілених внутрішніх зусиль в стиснутому бетоні $q_c = \frac{1}{2} f_{cd} b_f' (1 + \lambda)$.

4.6 Визначають контрольне значення моменту, при якому нейтральна вісь проходить по межі верхньої полицки та ребра $M_f = h_{eff} q_c (d - h_{eff} k_\lambda)$.

4.7 Перевіряють умову $M_{Ed} \leq M_f$.

Якщо умова виконується, роблять висновок, що нейтральна вісь знаходиться в межах полицки і йдуть до п. 4.8.

Якщо умова не виконується, роблять висновок, що нейтральна вісь знаходиться в межах ребра і йдуть до п. 4.9.

4.8 Поступово виконують п.п. 3.2–3.12, підбираючи армування або тільки в розтягнутій зоні бетону, або і в розтягнутій, і в стиснутій зонах бетону.

4.9 Визначають контрольне значення моменту, при якому постійні напруження стиску бетону знаходяться тільки в поличці, а пружні – повністю в ребрі

$$M_{f1} = f_{cd} h_{eff} B_1 \left(d - h_{eff} \frac{B_2}{B_1} \right),$$

$$\text{де } B_1 = b'_f + \frac{0,5(1-\lambda)}{\lambda} b_w, \quad B_2 = 0,5b'_f + b_w \frac{0,5(1-\lambda)}{\lambda} \cdot \frac{1+2\lambda}{3\lambda}.$$

4.10 Перевіряють виконання умови $M_f < M_{Ed} \leq M_{f1}$.

Якщо умова виконується, то роблять висновок, що бетон в стиснутій зоні працює пружно і в ребрі, і в поличці та йдуть до п. 4.11.

Якщо умова не виконується ($M_{Ed} > M_{f1}$), то роблять висновок, що бетон в стиснутій зоні працює пружно тільки в ребрі, і йдуть до п. 4.18.

4.11 Знаходять значення висоти стиснутої зони бетону

$$x_1 = \frac{dq_{cl} - \sqrt{d^2 q_{cl}^2 - 4q_{cl} k_\lambda M_w}}{2q_{cl} k_\lambda},$$

$$\text{де } q_{cl} = \frac{1}{2} f_{cd} b_w (1 + \lambda); \quad M_w = M_{Ed} - f_{cd} (b'_f - b_w) h_{eff} (d - 0,5h_{eff}).$$

4.12 Перевіряють виконання умови $x_1 \leq x_{1r}$.

Якщо вона виконується, роблять висновок, що необхідно встановити повздовжню робочу арматуру тільки в розтягнутій зоні, і йдуть до п. 4.13.

Якщо умова не виконується, роблять висновок про необхідність встановлення повздовжньої робочої арматури і в стиснутій, і в розтягнутій зонах бетону, та йдуть до п. 4.15.

4.13 Знаходять розрахункове значення необхідної площі робочої

$$\text{повздовжньої арматури в розтягнутій зоні } A_s = \frac{f_{cd} [h_{eff} (b'_f - b_w) + 0,5x_1 b_w (1 + \lambda)]}{f_{yd}}.$$

4.14 Підбирають діаметр і кількість стержнів робочої арматури в розтягнутій зоні балки.

4.15 Знаходять розрахункове значення необхідної площі робочої повздожньої арматури в стиснутій зоні бетону

$$A'_s = \frac{M_{Ed} - M_{eff} - x_{lr} q_{cl} (d - x_{lr} \cdot k_\lambda)}{f_{yd} (d - a'_s)}$$

4.16 Знаходять розрахункове значення необхідної площі робочої арматури

в розтягнутій зоні $A_s = \frac{f_{cd} [h_{eff} (b'_f - b_w) + 0,5x_1 b_w (1 + \lambda)] - f_{yd}' A'_s}{f_{yd}}$.

4.17 По таблицям підбирають діаметр і кількість стержнів арматури в стиснутій і розтягнутій зонах бетону.

4.18 Знаходять висоту стиснутої зони бетону $x_1 = h_{eff} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{M_{f1} - M_{Ed}}{M_{f1} - M_f} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) \right]$.

4.19 Перевіряють виконання умову $x_1 \leq x_{lr}$. Якщо вона виконується, роблять висновок, щодо необхідності встановлення робочої повздожньої арматури тільки в розтягнутій зоні, і йдуть до п. 4.20.

Якщо умова не виконується – роблять висновок про необхідність встановлення робочої повздожньої арматури і в стиснутій, і в розтягнутій зонах бетону, та йдуть до п. 4.23.

4.20 Визначають розрахункове значення необхідної площі робочої

арматури в розтягнутій зоні $A_s = \frac{0,5f_{cd} \left[b'_f x_1 (1 + \lambda) - (b'_f - b_w) \frac{(x_1 - h_{eff})^2}{x_1 (1 - \lambda)} \right]}{f_{yd}}$.

4.21 По таблицям підбирають діаметр і кількість стержнів робочої арматури в розтягнутій зоні.

4.22 Знаходять необхідну площу робочої арматури в стиснутій зоні бетону

$$A'_s = \frac{M_{Ed} - M_{ul}}{f_{yd}' (d - a'_s)},$$

$$M_{ul} = 0,5f_{cd} \left[b'_f x_{lr} (1 + \lambda) (d - x_{lr} k_\lambda) - (b'_f - b_w) \frac{(x_{lr} - h_{eff})^2}{x_{lr} (1 - \lambda)} \left(d - h_{eff} - \frac{x_{lr} - h_{eff}}{3} \right) \right].$$

4.23 Знаходять необхідну площу робочої арматури в розтягнутій зоні

$$A_s = \frac{0,5f_{cd} \left[b'_f x_{1r} (1 + \lambda) - (b'_f - b_w) \frac{(x_{1r} - h_{eff})^2}{x_{1r} (1 - \lambda)} \right] - f_{yd}' A'_s}{f_{yd}}.$$

4.24 По таблицям підбирають діаметр і кількість робочих стержнів арматури в стиснутій і розтягнутій зонах бетону.

5. Визначення робочого армування позацентрово стиснутих елементів прямокутного перерізу

При вирішенні задачі розрахунку робочого армування позацентрово стиснутих елементів використовуються напрацювання попередніх задач та пропозиції, викладені у [4].

5.1 Визначають розрахункову довжину стиснутого елемента l_0 в залежності від його розрахункової схеми.

5.2 Визначають випадковий ексцентриситет e_i , приймаючи найбільше з трьох значень

$$e_i = \begin{cases} l_0/600, & \text{де } l_0 - \text{розрахункова довжина елемента;} \\ h/30, & \text{де } h - \text{висота перерізу;} \\ 10 \text{ мм.} \end{cases}$$

5.3 Обчислюють площу бетонного перерізу $A_c = bh$.

5.4 Визначають радіус інерції бетонного перерізу $i = 0,289h$.

5.5 Визначають гнучкість при повздовжньому згині $\lambda = l_0/i$.

5.6 Обчислюють відносну осьову силу $n = N_{Ed} / A_c f_{cd}$.

5.7 Знаходять мінімальне значення гнучкості $\lambda_{min} = 10,78 / \sqrt{n}$.

5.8 Перевіряють умову $\lambda \leq \lambda_{min}$.

У випадку виконання умов роблять висновок, що впливами другого порядку можна знехтувати, і йдуть до п.5.9.

Якщо умова не виконується, роблять висновок, що необхідно врахувати впливи другого порядку, тобто збільшити загальний ексцентриситет, і йдуть до п.5.10.

5.9 Приймають, що загальний ексцентриситет дорівнює випадковому, тобто $e_0 = e_i$, і йдуть до п.5.13.

5.10 Визначають номінальну жорсткість перерізу

$$EI = 0,15E_{cd} \frac{bh^3}{12} + 0,01E_s A_c (0,5h - a_s')^2 .$$

5.11 Обчислюють критичну силу $N_b = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_0^2}$.

5.12 Визначають загальний ексцентриситет $e_0 = e_i \left\{ 1 + \frac{1,232}{\frac{N_b}{N_{Ed}} - 1} \right\}$.

5.13 Визначають відстань від центра ваги перерізу до крайньої точки ядрового перерізу $r = \frac{h}{6}$.

5.14 Перевіряють виконання умови $e_0 \leq r$.

У випадку виконання умови роблять висновок, що буде реалізовуватись перша форма рівноваги - весь переріз буде працювати на стиск, і йдуть до п.5.15.

У випадку, коли зазначена умова не буде виконуватись, роблять висновок про те, що реалізується друга форма рівноваги, тобто частина перерізу буде працювати на стиск, а частина на розтяг, і йдуть до п. 5.32.

5.15 Визначають загальний ексцентриситет зовнішнього навантаження $e = e_0 + 0,5 \cdot h - a_s$.

5.16 Знаходять висоту стиснутої зони бетону $x_1 = h \cdot \frac{\varepsilon_{cu3.cd}}{\varepsilon_{cu3.cd} - \varepsilon_{c(2)}}$, де

деформації на менш стиснутій грані бетону $\varepsilon_{c(2)} = \varepsilon_{cu3.cd} \left(1 - \frac{e_0}{r}\right)$.

5.17 Розраховують висоту частини стиснутої зони бетону з постійними напруженнями $\lambda x_1 = x_1 \cdot \frac{\varepsilon_{cu3.cd} - \varepsilon_{c3.cd}}{\varepsilon_{cu3.cd}}$.

5.18 Перевіряють виконання умови $\lambda x_1 \geq h$.

Якщо умова виконується, йдуть до п.5.19.

Якщо умова не виконується, йдуть до п.5.27.

5.19 Приймають напруження в більш стиснутій арматурі $\sigma_c = f_{cd}$.

5.20 Визначають необхідне армування більш напружених стрижнів $A_s' = \frac{N_{ed} e - f_{cd} b h (0,5h - a_s)}{f_{yd} (d - a_s')}$.

5.21 Обчислюють деформації менш напруженої арматури

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu3.cd} \frac{x_1 - d}{x_1}.$$

5.22 Перевіряють виконання умови $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s < \varepsilon_{ud}$.

Якщо умова виконується, роблять висновок, що арматура працює в стадії текучості, тобто $\sigma_s = f_{yd}$, і йдуть до п.5.23.

Якщо умова не виконується, роблять висновок, що арматура працює пружно, тобто $\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$, і йдуть до п.5.23.

5.23 Визначають армування менш напружених стрижнів

$$A_s = \frac{N_{ed} - f_{cd} b h - f_{yd} A_s'}{\sigma_s}.$$

5.24 Враховуючи принцип симетричного армування, приймають площу армування із більшим значенням $A_s = A_s'$.

5.25 Розраховують мінімально необхідне значення площі арматури із двох

значень
$$A_{s,\min} = A_{s,\text{tot}} = \begin{cases} 0,10N_{\text{ed}} \\ f_{\text{yd}} \\ 0,002 \cdot A_c \end{cases} .$$

5.26 Порівнюючи результати необхідного армування, отримані в п.п.5.24 та 5.25, остаточно приймають більше.

5.27 Визначають необхідну кількість більш напруженої арматури

$$A_s' = \frac{N_{\text{Ed}} e - f_{\text{cd}} b \frac{(h + \lambda x_1)}{2} (d - \frac{h + \lambda x_1}{4})}{f_{\text{yd}} (d - a_s')} .$$

5.28 Обчислюють деформації менш напруженої арматури

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\text{cu3.cd}} \frac{x_1 - d}{x_1} .$$

5.29 Перевіряють виконання умови $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s < \varepsilon_{\text{ud}}$.

Якщо умова виконується, роблять висновок, що арматура працює в стадії текучості, тобто $\sigma_s = f_{\text{yd}}$, і йдуть до п.5.30.

Якщо умова не виконується, роблять висновок, що арматура працює пружно, тобто $\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$, і йдуть до п.5.30.

5.30 Визначають армування менш напружених стрижнів

$$A_s = \frac{N_{\text{Ed}} - f_{\text{cd}} b \frac{(h + \lambda x_1)}{2} - f_{\text{yd}} A_s'}{\sigma_s} .$$

5.31 Послідовно виконують п.п.5.24-5.26.

5.32 Визначають контрольне значення висоти стиснутої зони бетону

$$x_{1r} = d \frac{\varepsilon_{\text{cu3.cd}}}{\varepsilon_{\text{cu3.cd}} + \varepsilon_{s0}} .$$

5.33 Розраховують деформації в стиснутій арматурі $\varepsilon_s' = \varepsilon_{\text{cu3.cd}} \frac{x_{1r} - a_s'}{x_{1r}}$.

5.34 Перевіряють умову $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s' < \varepsilon_{\text{ud}}$.

Якщо умова виконується, приймають $\sigma_s' = f_{yd}'$.

Якщо умова не виконується – $\sigma_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s$.

5.35 Як і в попередніх задачах послідовно визначають: $q_c = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot b(1 + \lambda)$;

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{cu3.cd} - \varepsilon_{c3.cd}}{\varepsilon_{cu3.cd}}; k_\lambda = \frac{1 + \lambda(1 + \lambda)}{3(1 + \lambda)}.$$

5.36 Визначають площу стиснутої арматури $A_s' = \frac{N_{ed}e - q_c \cdot x_{lr}(d - k_\lambda \cdot x_{lr})}{\sigma_s'(d - a_s')}$.

5.37 Розраховують площу розтягнутої (менш стиснутої) арматури

$$A_s = \frac{q_c \cdot x_{lr} + \sigma_s' \cdot A_s' - N_{ed}}{f_{yd}}.$$

5.38. Послідовно виконують п.п.5.25-5.27.

Наведені вище алгоритми можуть застосовуватись як в учбовому процесі при навчанні інженерів-проектувальників, так і для експертної оцінки раціональності прийнятих проектних рішень, а також при розробці посібника з проектування залізобетонних конструкцій [2].

Література

1. ДБН В.2.6-982009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К., Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 71 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. К., Мінрегіонбуд України, 2011. – 156 с.
3. Железобетонные конструкции. Общий курс: учеб.пособие для вузов/В.И. Мурашов, Э.Е. Сигалов, В.Н. Байков – М.:Госстройиздат 1962. – 659 с.
4. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СніП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова та ін.; за ред. В.С. Шмуклера.– Харків:Золоті сторінки, 2015.–208 с.