

УДК 624.012.24:539.43

Дробишинець С.Я. к.т.н., доцент
Луцький національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ ТА МІЦНОСТІ КОМБІНОВАНО-АРМОВАНИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті запропоновано методику визначення напружено-деформаційного стану і міцності нормальних перерізів комбіновано-армованих згинальних елементів з урахуванням залежностей між напруженнями і деформаціями в сталевібробетоні на основі деформаційної розрахункової моделі.

Ключові слова: напружено-деформований стан, деформаційна модель.

На сучасному етапі удосконалення теорії бетону і залізобетону, розробляються методики розрахунків елементів конструкцій на основі розрахункової деформаційної моделі. Стосовно комбіновано-армованих конструкцій на основі сталевібробетону, подібні методики ще є недостатньо розроблені.

Для визначення міцності залізобетонних згинальних елементів чинні норми проектування рекомендують виходити з розрахункової схеми, в якій епюра напружень в стиснутій зоні бетону приймається у вигляді прямокутника, робота розтягнутого бетону не враховується, а в граничному стані напруження в бетоні і арматурі досягають границь міцності. Для сталевіброзалізобетонних елементів з одиночним армуванням аналогічна розрахункова схема може бути представлена у вигляді, представленому на рис. 1.

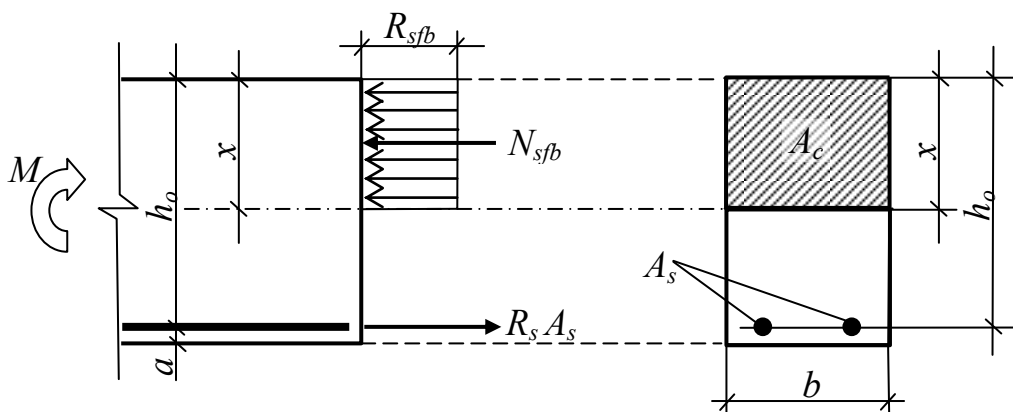


Рис.1. Схема зусиль і епюра напружень в перерізі, нормальному до поздовжньої осі згинального комбіновано-армованого елемента.

Виходячи з розрахункової схеми (рис.1), умови міцності матимуть вигляд:

$$M \leq R_{sfb} b x (h_0 - 0,5x), \quad (1)$$

$$R_s A_s = R_{sfb} b x. \quad (2)$$

Проте, як стандартна розрахункова схема так і розрахункова схема напруженого стану комбіновано-армованого (сталевіброзалізобетонного) елемента представлена на (рис.1) має ряд недоліків. В дійсності, як показують експериментальні дослідження, епюра напружень в розтягнутій зоні перед руйнуванням не є прямокутною і на нейтральній лінії напруження не досягають $R_{sfb,t}$. Також, в стиснутій зоні епюра напружень дещо відхиляється від форми у вигляді трикутника. Крім цього, побудовані формули на прийнятій фізичній моделі напружень в поперечному перерізі дають змогу визначити несучу здатність елемента тільки в граничному стані і вони не придатні для визначення напружено-деформаційного стану при різних рівнях навантаження.

Відмічені вади прийнятої в нормативних документах методики розрахунку згинальних елементів можна усунути, використавши розрахункову деформаційну модель поперечного перерізу. Деформаційна модель включає рівняння зовнішніх і внутрішніх зусиль, умови деформування у вигляді гіпотези плоских перерізів та дійсні діаграми деформування матеріалів. За критерій міцності будемо приймати, в даному випадку, досягнення граничних деформацій в сталевібробетоні розтягнутої зони.

Тому доцільно розглянути методику розрахунку сталевіброзалізобетонних елементів, виходячи з криволінійної епюри напружень в стиснутій зоні сталевібробетону (рис.2), тобто з огляду на розрахункову деформаційну модель.

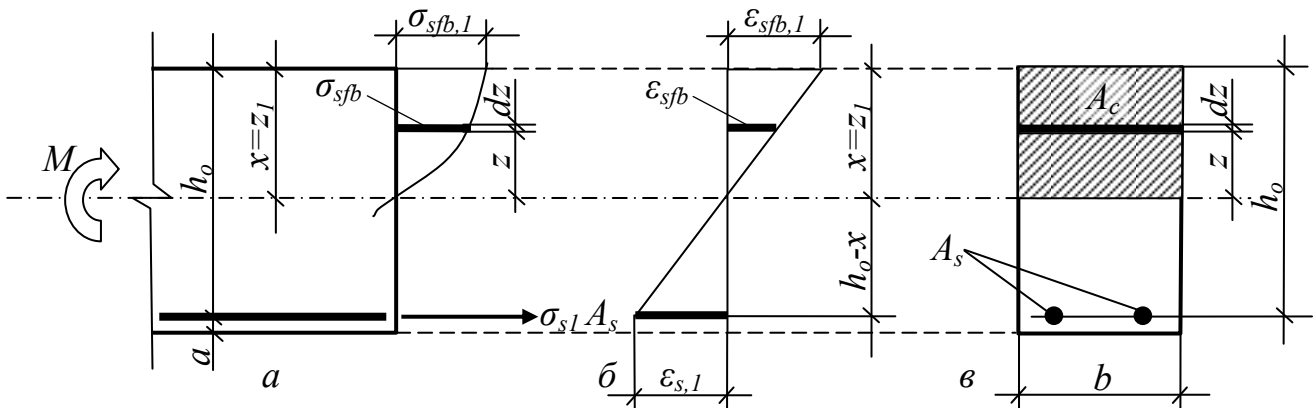


Рис.2. Схема розподілення напружень (а) і деформацій (б) в нормальному перерізі (в) згинального комбіновано-армованого елемента.

За фіксованого значення z_1 і $\epsilon_{sfb,1}$ рівняння рівноваги поперечного перерізу запишемо у вигляді:

$$M_1 = M_{c1} + M_{s1} = \frac{b \cdot z_1^2}{\epsilon_{sfb,1}^2} \int_0^{\epsilon_{sfb,1}} \sigma_{sfb} \epsilon_{sfb} d\epsilon_{sfb} + E_s \epsilon_{s1} A_s (h_0 - z_1), \quad (3)$$

$$\frac{b \cdot z_1}{\epsilon_{sfb,1}} \int_0^{\epsilon_{sfb,1}} \sigma_{sfb} d\epsilon_{sfb} - E_s \epsilon_{s1} A_s = 0, \quad (4)$$

де E_s – модуль пружності арматури;

A_s – площа поперечного перерізу розтягнутої арматури.

З урахуванням вирішення інтегралів формули (3) і (4) перепишемо у вигляді:

$$M_1 = C \frac{b \cdot z_1^2}{\varepsilon_{sfb,1}^2} + E_s \varepsilon_{s1} A_s (h_0 - z_1), \quad (5)$$

$$A \frac{b \cdot z_1}{\varepsilon_{sfb,1}} = E_s \varepsilon_{s1} A_s, \quad (6)$$

$$\text{де } \varepsilon_{s1} = \frac{\varepsilon_{sfb,1}}{z_1} (h_0 - z_1), \quad (7)$$

З використанням формул (5) і (6) можна визначити внутрішні зусилля за будь-якого рівня завантаження, при відомому значенні однієї із деформацій матеріалів, граничну несучу здатність елемента (руйнуючий момент), а також визначити площу поперечного перерізу поздовжньої арматури. Всі три задачі вирішуються методом послідовних наближень.

Визначення внутрішніх зусиль. Розглядаємо згинальний елемент прямокутного профілю з одиночною арматурою. Для цього на діаграмі деформування сталевібробетону вибираємо фіксоване значення деформації крайнього стиснутого волокна $\varepsilon_{sfb,1}$, якому відповідає фіксоване значення напруження в сталевібробетоні $\sigma_{sfb,1}$ при заданому навантаженні. Щоб використати формули (1) і (2) необхідно знати фіксоване значення висоти стиснутої зони бетону $x = z_1$. Послідовність розрахунку і полягає в тому, щоб відшукати значення z_1 , яке б задовольнило умову (6).

В першому наближенні значення z_1 , можна визначити за умови, що в граничному стані епюра напружень буде мати прямокутну форму, тобто:

$$z_{1(1)} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_{sR} \cdot A_s}{R_{sfb} \cdot b}, \quad (8)$$

де ε_{sR} – гранична деформація арматури ($\varepsilon_{sR} = \sigma_y / E_s$, σ_y – межа текучості арматури).

За прийнятих $\varepsilon_{sfb,1}$ і $z_{1(1)}$ перевіряється умова (6). Якщо вона виконується, то за формулою (5) визначається внутрішній згинальний момент в поперечному перерізі елемента. Якщо ж умова (6) не виконується, то необхідно корегувати значення z_1 . У випадку, коли в рівнянні (6) ліва частина переважає праву, то можна прийняти в другому наближенні $z_{1(2)} = 0,95 \cdot z_{1(1)}$, а коли навпаки, то прийняти $z_{1(2)} = 1,05 \cdot z_{1(1)}$. Таким же чином можна здійснити корегування значення z_1 і в третьому наближенні. Наближення можна здійснювати до значення z_1 , коли ліва і права частина будуть відрізнятися не більше, ніж на 5%.

Задачу можна вирішити іншим шляхом, задавшись спочатку деформацією розтягнутої арматури, яка відповідає певному навантаженню. З прийняттям значення ε_{s1} фіксується рівнодіюча в розтягнутій арматурі і стиснутій зоні бетону:

$$N_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_s = N_{b1}, \quad (9)$$

Для визначення N_{b1} деформацію в стиснутому сталевібробетоні знайдемо за гіпотезою плоских перерізів: $z_1 = h_0 / \xi_1$

$$\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{s1} \frac{z_1}{h_0 - z_1} = \frac{\varepsilon_{s1}}{\xi_1 - 1}, \quad (10)$$

$$\text{де } \xi_1 = h_0 / z_1. \quad (11)$$

Враховуючи формули (9), (10) і (11) запишемо умови рівноваги елемента у вигляді:

$$N_{b1} = N_{s1} = A \frac{b \cdot h_0 / \xi_1}{\varepsilon_{s1} / (\xi_1 - 1)} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s \cdot A_s, \quad (12)$$

В першому наближенні відношення $\xi_{1(1)}$ можна прийняти рівним $\xi_{1(1)} \approx 2$, потім за формулою (10) визначимо $\varepsilon_{b1(1)}$, після підстановки якого в формулу (12) знайдемо:

$$\xi_{1(1,1)} = \frac{Abh_0}{Abh_0 - \varepsilon_{s1}^2 E_s A_s}, \quad (13)$$

Може виявитись, що $\xi_{1(1)} \neq \xi_{1(1,1)}$, тому необхідно зробити нове наближення, прийнявши:

$$\xi_{1(2)} = 0,5[\xi_{1(1)} + \xi_{1(1,1)}], \quad (14)$$

і обчислення продовжувати до тих пір, поки $\xi_{1(n)} \neq \xi_{1(n,n)}$, де n – кількість наближень. Після кінцевого визначення z_1 і $\varepsilon_{sfb,1}$ повинна виконуватись умова (12), а за формулою (5) можна визначити згинальний момент внутрішніх зусиль, який буде відповідати певному навантаженню.

Визначення руйнуючого моменту. Прийmemo, що руйнування згинального елемента по нормальному перерізу відбудеться у випадку, коли деформації в арматурі і в крайньому стиснутому волокні сталевібробетону досягнуть максимальних значень, тобто $\varepsilon_s = \varepsilon_{sR}$ і $\varepsilon_{sfb} = \varepsilon_{sfb,R}$. Для визначення руйнуючого моменту використаємо наведену вище методику визначення внутрішніх зусиль.

Прийmemo, що $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$, тоді умова (6) набуде вигляду:

$$A \frac{b \cdot z_1}{\varepsilon_{sfb,1}} = E_s \cdot \varepsilon_{sR} \cdot A_s, \quad (15)$$

По формулі (8) визначаємо $z_{1(1)}$ в першому наближенні і за виразом (10) знаходимо відповідну деформацію в бетоні при $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$, тобто:

$$\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sR} \frac{z_1}{h_0 - z_1}, \quad (16)$$

Якщо виявиться, що $\varepsilon_{sfb,1} > \varepsilon_{sfb,R}$, то необхідно прийняти $\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sfb,R}$, задатися z_1 і обчислити ε_{s1} по формулі (7) при $\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sfb,R}$. Після цього задача вирішується методом поступового наближення. Після визначення z_1 , $\varepsilon_{sfb,1}$ і ε_{s1} , руйнуючий момент M_u можна визначити за такими формулами:

– при руйнуванні, коли $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$ і $\varepsilon_{sfb,1} < \varepsilon_{sfb,R}$:

$$M_u = C \frac{b \cdot z_1^2}{\varepsilon_{sfb,1}^2} + E_s \cdot \varepsilon_{sR} \cdot A_s (h_0 - z_1), \quad (17)$$

– при руйнуванні, коли $\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sfb,R}$, і $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{sR}$:

$$M_u = C \frac{b \cdot z_1^2}{\varepsilon_{sfb,R}^2} + E_s \cdot \varepsilon_{s1} \cdot A_s (h_0 - z_1), \quad (18)$$

– при одночасному виконанні умов $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$ та $\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sfb,R}$:

$$M_u = C \frac{b \cdot z_1^2}{\varepsilon_{sfb,1}^2} + E_s \cdot \varepsilon_{sR} \cdot A_s (h_0 - z_1), \quad (19)$$

В формулі (16) значення z_1 знаходиться за формулою:

$$z_1 = h_0 \frac{\varepsilon_{sfb,R}}{\varepsilon_{sR} + \varepsilon_{sfb,R}}, \quad (20)$$

За аналогічною методикою можна визначити руйнуючий момент і для елементів, які піддавались повторним навантаженням, але механічні характеристики сталевібробетону необхідно використовувати з урахуванням впливу на них малоциклових повторних навантажень, а також залежності $\sigma_{sfb,cyc}$ – $\varepsilon_{sfb,cyc}$.

Розрахунок поздовжньої робочої арматури. В багатьох випадках проектування згинальних сталевібробетонних елементів за заданими згинальними моментами від зовнішнього навантаження M , необхідно знайти площу поперечного перерізу поздовжньої робочої арматури.

Розглянемо згинальний елемент прямокутного профілю з одиночною арматурою. Логічно, що найбільш економічним буде таке армування, коли максимально будуть використані механічні характеристики матеріалів. Такій умові відповідають $\varepsilon_{sfb,1} = \varepsilon_{sfb,R}$, $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$ та $z_1 = z_R$, де z_1 – фіксована висота зони стиснутого бетону і визначається за формулою (20).

Враховуючи наведене, прийнявши $M = M_u$, необхідну площу арматури знайдемо з формули (19):

$$A_s = \frac{M - C \frac{b \cdot z_R^2}{\varepsilon_{sfb,R}^2}}{E_s \cdot \varepsilon_{sR} (h_0 - z_R)}, \quad (21)$$

У випадках, коли розміри поперечного перерізу задаються конструктивно і руйнування починається з розтягнутої арматури, прийmemo $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{sR}$ і задачу віднаходження значення A_s вирішуємо методом послідовних наближень, тобто знаходимо $\varepsilon_{sfb,1}$ і z_1 такі, щоб виконувалась умова:

$$A \frac{b \cdot z_1}{\varepsilon_{sfb,1}} = E_s \cdot \varepsilon_{sR} \cdot A_s, \quad (22)$$

після чого площу арматури знайдемо з формули (18):

$$A_s = \frac{M - C \frac{b \cdot z_1^2}{\varepsilon_{sfb,1}^2}}{E_s \cdot \varepsilon_{sR} (h_0 - z_1)}, \quad (23)$$

За аналогічними формулами можна визначити площу арматури в згинальних елементах, які піддаються повторним малоцикловим навантаженням. В цьому випадку механічні характеристики сталевібробетону підставляються в формули з урахуванням змін, які відбуваються при повторних навантаженнях.

Запропонована методика дає можливість визначити напружено-деформаційний стан згинальних елементів на будь якій стадії короткочасного одноразового і повторного малоциклового навантаження.

Список використаних джерел

1. Бабич Є.М., Дробишинець С.Я. Експериментальні дослідження роботи сталевіброзалізобетонних балок при повторних навантаженнях // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: Збірник наукових праць. – Рівне, 2003. – Випуск 28: - с. 44-52.
2. Дробишинець С.Я. Експериментальні дослідження сталевібробетонних та сталевіброзалізобетонних балок при одноразовому та малоцикловому навантаженні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне, 2003. – Випуск 9: - с. 218-224.
3. Бабич Є.М., Дробишинець С.Я. Робота сталевібробетонних та сталевіброзалізобетонних балок при одноразовому та повторних малоциклових навантаженнях // Сталевібробетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація // Збірник наукових статей. Випуск 6. – Кривий Ріг: КТУ, 2004. - с. 65-71.
4. Дробишинець С.Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі.: Дис ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2005. – 192 с.

ANNOTATION

In the article proposed the method of determining the stress-deformation state and strength of normal cross sections of combined-reinforced bending elements with consideration of the dependencies between the stresses and strains in steel fiber concrete based on deformational calculation model.

Keywords: mode of deformation, deformation model.

АННОТАЦИЯ

В статье предложена методика определения напряженно-деформационного состояния и прочности нормальных сечений комбинированно-армированных изгибаемых элементов с учетом зависимостей между напряжениями и деформациями в сталефибробетоне на основе деформационной расчетной модели.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, деформационная модель