

УДК 624.012:624.046

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ
КІЛЬЦЕВОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА СПРОЩЕНИМИ ДІАГРАМАМИ
ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ І АРМАТУРИ**

д.т.н., с.н.с. Бамбура А.М., інж. Дорогова О.В.

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» м. Київ, Україна

Виконаний в нашій державі широкий комплекс експериментально-теоретичних досліджень дозволив розробити основи прикладної деформаційної теорії залізобетону [1, 2, 3]. В рамках цієї теорії розроблені розрахункові залежності та алгоритм оцінки напружено-деформованого стану залізобетонних елементів прямокутного, кругового, таврового та двотаврового перерізів, що нашло втілення в чинному ДБН В.6.2-98:2009 та ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [5,6]. Щодо елементів кільцевого перерізу то така робота виконана тільки при використанні повних діаграм деформування бетону [4].

Метою даної роботи є розробка розрахункових залежностей та алгоритму щодо визначення напружено-деформованого стану та несучої здатності позациентрово стиснутих залізобетонних елементів кільцевого перерізу на основі спрощених діаграм деформування бетону і арматури та деформаційної моделі залізобетону.

Розрахунковий апарат щодо визначення напружено-деформованого стану та несучої здатності попередньо напружених залізобетонних елементів кільцевого перерізу розроблений на основі гіпотез та допущень розділу 6.1 ДБН В.6.2-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення». Причому в рамках даної статті наведено розрахунковий апарат, який базується на спрощеній діаграмі деформування бетону в вигляді діаграми Прандтля з обмеженою горизонтальною віткою згідно рис. 3.2 ДБН В.6.2-98:2009.

Так, якщо до розрахункового перерізу (рис. 1) прикласти зусилля N , при цьому $M=Ne$, які виникли в результаті прикладення короткочасного навантаження, та, записуючи умови рівноваги і використовуючи передумови і допущення [5], неважко отримати систему рівнянь рівноваги (1)-(2) для вирішення поставленої задачі.

$$F(N, \varepsilon_{c(1)}) - N = 0; \quad (1)$$

$$\Phi(N, \varepsilon_{c(1)}) - M = 0 \quad (2)$$

де $N = \frac{1}{\rho} = \frac{(\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)})}{2r_1}$ – кривизна вигнутої осі в перерізі;

$\varepsilon_{c(1)}$ – осереднені деформації бетону стиснутої фібри;

$\epsilon_c(2)$ – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону;

$2r_1$ – загальна висота перерізу;

N і M – зовнішні поздовжня сила і згинальний момент.

Звертаємо увагу на те, що при згині $N=0$, а при позацентровому стиску $M = N(x_1 - r_1 + e)$, де r_1 – зовнішній радіус кільця,

e – ексцентриситет прикладення зовнішньої сили щодо центра ваги перерізу, інші позначення зрозумілі з рис. 1.

При цьому в процесі навантаження можлива реалізація чотирьох форм рівноваги кільцевого перерізу – весь переріз стиснутий, область існування даної форми $x_1 > 2r_1$ (рис.1). Друга форма рівноваги перерізу, це коли нейтральна вісь у межах нижньої частини стінки кільця, область існування даного випадку $2r_1 > x_1 > r_1 + r_2$ (рис. 2). Третя форма рівноваги перерізу, це коли нейтральна вісь у межах перерізу і перетинає внутрішній круг, область існування даного випадку $r_1 + r_2 > x_1 > r_1 - r_2$ (рис.3). Четверта форма рівноваги перерізу, це коли нейтральна вісь знаходиться в межах верхньої частини стінки кільця, область існування даного випадку $x_1 < r_1 - r_2$.

Враховуючи те, що використовується спрощена діаграма деформування бетону, яка складається з двох відрізків які відображають пружну і пластичну роботу бетону, то в залежності від того де проходить лінія розподілу між пружними і пластичними деформаціями в перерізі кожна форма рівноваги буде мати декілька випадків. Так, перша форма рівноваги буде мати чотири випадки (рис. 1). Перший випадок це коли весь переріз працює пружно (рис. 1,в). Другий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах верхньої частини тіла кільця (рис. 1,г). Третій випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах внутрішнього круга (рис. 1,д). Четвертий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах нижньої частини тіла кільця (рис. 1,ж).

Аналогічно друга форма рівноваги буде мати чотири випадки (рис. 2). Перший випадок це коли по всій висоті стиснутої зони бетон працює в пружній стадії (рис. 2,в). Другий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах верхньої частини тіла кільця (рис. 2,г). Третій випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах внутрішнього круга (рис. 2,д). Четвертий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах нижньої частини тіла кільця (рис. 2,ж). Третя форма рівноваги буде мати три випадки (рис. 3). Перший випадок це коли по всій висоті стиснутої зони бетон працює в пружній стадії (рис. 3,в). Другий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах верхньої частини тіла кільця (рис. 3,г). Третій випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах внутрішнього круга (рис. 3,д).

Відповідно четверта форма рівноваги має дві форми рівноваги. Перший випадок це коли по всій висоті стиснутої зони бетон працює в пружній стадії. Другий випадок, це коли пластична зона знаходиться в межах верхньої частини тіла кільця.

У зв'язку з обмеженістю об'єму публікації немає можливості навести формули для всіх чотирьох форм рівноваги і 13 випадків навіть в інтегральному вигляді внаслідок їхньої громіздкості.

Розглянемо першу форму напружено-деформованого стану перерізу.

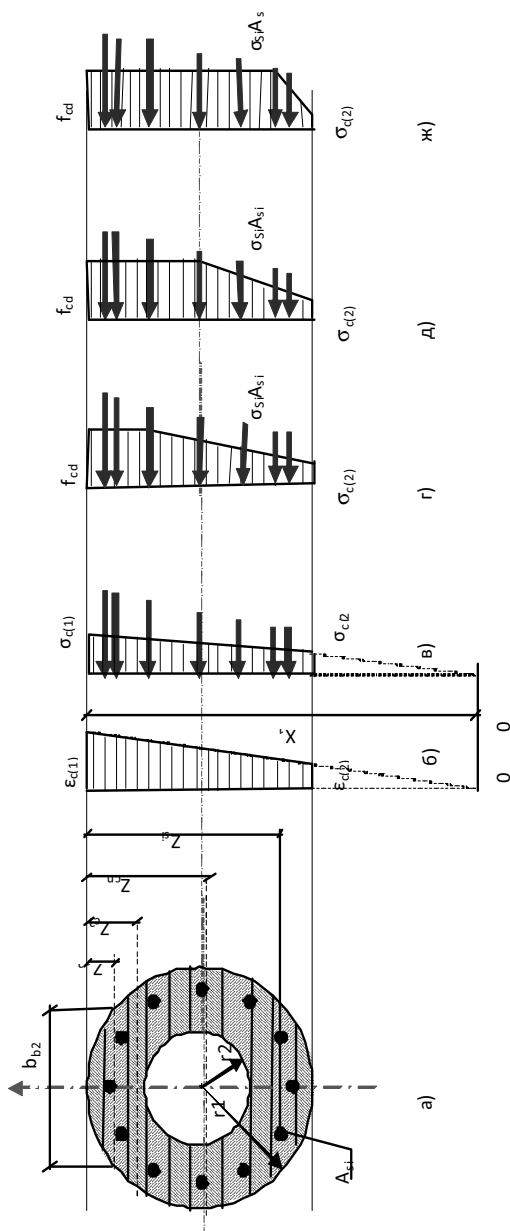


Рис. 1. Перша форма рівноваги.
 а) розрахунковий переріз;
 б) епюра деформацій;
 в, г, д, ж) епюри напружень.

Розіб'ємо стиснуту зону залізобетонного елемента кільцевого перерізу на m шарів (рис. 1), перпендикулярних вісі дії моменту. Величину осьової сили N та моменту M , які сприймає переріз будемо визначати як різницю між вказаними величинами для перерізу з діаметром r_1 та перерізу з діаметром r_2 .

Для перерізу з діаметром r_1 відстань від найбільш стиснутої точки перерізу до середини довільного шару z_{cn} для першої форми рівноваги (рис. 1), оскільки весь переріз є стиснутим, то на m шарів розділяється весь переріз, і тому величини z_{cn} визначається за наступною залежністю

$$z_{cn} = \frac{2r_1[(n-1)+0,5]}{m}, \quad (3)$$

де m - кількість шарів поділу;

n - порядковий номер шару який розглядається.

Висота шару поділу визначається за формулою:

$$h_{cn} = \frac{2r_1}{m}; \quad (4)$$

Ширина будь-якого шару поділу в межах перерізу (при $0 < z_{cn} \leq 2r_1$) визначається за формулою:

$$b_{cn} = 2\sqrt{2r_1z_{cn} - z_{cn}^2}; \quad (5)$$

Аналогічно параметри будь-якого шару поділу перерізу з діаметром r_2 при $(r_1-r_2) \leq z_{cn} \leq (r_1+2r_2)$ визначається за формулами:

$$z_{cn(2)} = \frac{2r_2[(n-1)+0,5]}{m_{(2)}}; \quad (6)$$

$$h_{cn(2)} = \frac{2r_2}{m_{(2)}}; \quad b_{cn(2)} = 2\sqrt{2r_2z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2}, \quad (7)$$

Використовуючи гіпотезу плоских перерізів неважко визначити напруження в середині кожного шару поділу (див. рис. 1).

Для перерізу з діаметром r_1 :

$$\sigma_{cn} = \varepsilon_{cn} E_{cd} \leq f_{cd}, \quad (8)$$

де $\varepsilon_{cn} = N(x_1 - z_{cn})$ - деформації середини шару поділу.

Для перерізу з діаметром r_2 :

$$\sigma_{cn(2)} = \varepsilon_{cn(2)} E_{cd} \leq f_{cd}, \quad (9)$$

де $\varepsilon_{cn(2)} = N(x_1 - z_{cn(2)} - r_1 + r_2)$ - деформації середини шару поділу.

З урахуванням залежностей (3 - 9) рівняння рівноваги для першої

форми, без урахування роботи бетону на розтяг, приймають вигляд:

$$\sum_{n=1}^m \frac{4r_1}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{4r_2}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} +$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = N$$

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^m \frac{4r_1(x_1 - z_{cn})}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \\ & \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{4r_2(x_1 - r_1 - r_2 - z_{cn(2)})}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} + \\ & \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Для другої форми рівноваги (рис. 2), оскільки стиснута зона складає частину розрахункового перерізу, відстань від найбільш стиснутої точки перерізу діаметром r_1 до середини довільного шару z_{cn} визначається за формулою:

$$z_{cn} = \frac{x_1[(n-1)+0,5]}{m}; \quad (12)$$

Висоту будь-якого шару поділу визначається за формулою

$$h_{cn} = \frac{2x_1}{m}; \quad (13)$$

а ширину за формулою (5).

Для перерізу діаметром $r_2 - z_{cn(2)}, h_{cn(2)}, b_{cn(2)}$, визначаються за формулами (6), (7).

Напруження в середині кожного шару поділу за формулами (8, 9) відповідно.

Таким чином з урахуванням формул (4-7), (8 - 9) та (12), рівняння рівноваги для другої форми, без урахування роботи бетону на розтяг, приймають вигляд:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^m \frac{2x_1}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{4r_2}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} + \\ & \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = N \end{aligned} \quad (14)$$

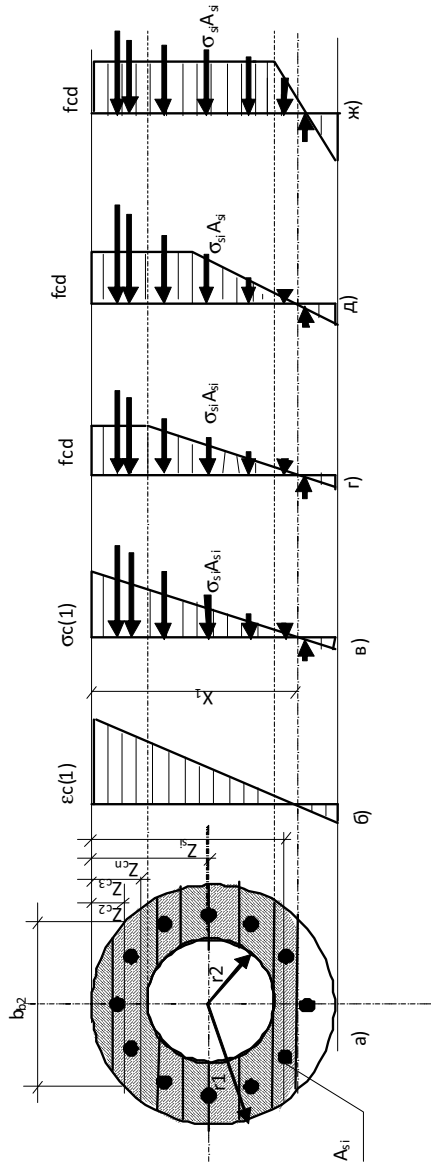


Рис.2. Друга форма рівноваги.
 а) розрахунковий переріз;
 б) еюра деформації;
 в,г,д,ж) еюра напружень.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=1}^m \frac{2x_1(x_1 - z_{cn})}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \\
 & \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{4r_2(x_1 - r_1 - r_2 - z_{cn(2)})}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} + \\
 & \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

Для третьої форми рівноваги (рис. 3), оскільки нейтральна вісь проходить в межах внутрішнього круга, відстань від найбільш стиснутої точки перерізу діаметром r_1 до середини довільного шару z_{cn} визначається за формулою (12) а висота будь-якого шару поділу визначається за формулою (13) а напруження в середині кожного шару поділу за формулою (8). Для перерізу діаметром r_2 напруження в середині кожного шару поділу за формулою (9), $b_{cn(2)}$ за формулою (7) а $h_{cn(2)}$, $z_{cn(2)}$ визначається за формулами:

$$h_{cn(2)} = \frac{x_1 - r_1 + r_2}{m_{(2)}}; \tag{16}$$

$$z_{cn(2)} = \frac{(x_1 - r_1 + r_2)[(n-1) + 0,5]}{m_{(2)}} \tag{17}$$

Таким чином з урахуванням формул (7),(8) та (12), (13), (16), (17) рівняння рівноваги для третьої форми, без урахування роботи бетону на розтяг, приймають вигляд:

$$\sum_{n=1}^m \frac{2x_1}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{2(x_1 - r_1 + r_2)}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} +; \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = N$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=1}^m \frac{2x_1(x_1 - z_{cn})}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} - \\
 & \sum_{n=1}^{m(2)} \frac{2(x_1 - r_1 + r_2)(x_1 - r_1 - r_2 - z_{cn(2)})}{m_{(2)}} \sigma_{cn(2)} \sqrt{2r_2 z_{cn(2)} - z_{cn(2)}^2} + \\
 & \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0
 \end{aligned} \tag{19}$$

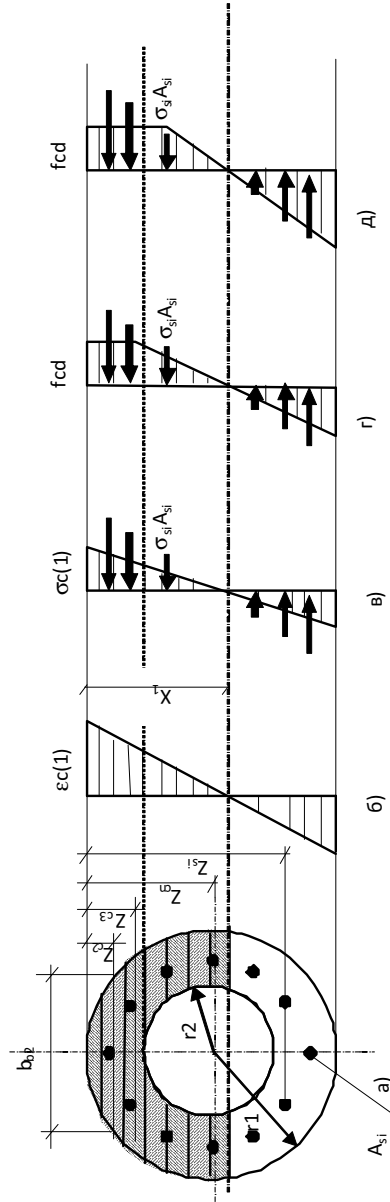


Рис.3. Третя форма рівноваги.
 а) розрахунковий переріз;
 б) етюра деформації;
 в, г, д) етюри напружень.

Для четвертої форми рівноваги, оскільки нейтральна вісь проходить в верхній частині кільця, відстань від найбільш стиснутої точки перерізу діаметром r_1 до середини довільного шару z_{cn} визначається за формулою (12) а висота і ширина будь-якого шару поділу визначається за формулами (5) і (13), напруження в середині кожного шару поділу за формулою (8).

Таким чином рівняння рівноваги для четвертої форми, без урахування роботи бетону на розтяг, приймають вигляд:

$$\sum_{n=1}^m \frac{2x_1}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = N; \quad (20)$$

$$\sum_{n=1}^m \frac{2x_1(x_1 - z_{cn})}{m} \sigma_{cn} \sqrt{2r_1 z_{cn} - z_{cn}^2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0 \quad (21)$$

Зусилля в арматурі незалежно від форми рівноваги визначаються відповідно за рекомендаціями, які наведені в [6] або в роботі [3] в залежності від того, яка арматура попередньо напружена або звичайна використовується для армування розрахункового перерізу.

Рішення отриманих систем нелінійних рівнянь згідно деформаційної методики [4], знаходиться підбором, за параметрами деформованого стану ϵ_{b1} і N (або ϵ_{b2}), після чого неважко знайти деформації на будь-якій відстані x від нейтральної лінії, а значить, за допомогою гіпотези плоских перерізів напруження в бетоні і арматурі. Таким чином, рішення систем рівнянь (10-11), (14-15), (18-19), (20-21) дозволяє виконати оцінку напружено-деформованого стану перерізу при будь-якому рівні навантаження.

Наведені системи нелінійних рівнянь для чотирьох форм рівноваги і методика розрахунку дозволяють не тільки виконати оцінку напружено-деформованого стану згинаних та позацентрово стиснутих залізобетонних попередньо напружених елементів кільцевого перерізу а використовуючи критерії вичерпання несучої здатності [6] визначити їх несучу здатність.

Співставлення результатів визначення несучої здатності залізобетонних елементів кільцевого перерізу за «точною», основою на криволінійній діаграмі деформування [4], та за спрощеною показало, що максимальна похибка в розрахунках, якщо поділ стиснутої зони прийняти на $m=40$ шарів, не перевищує 5%. Що з точки зору практики цілком задовільно.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бамбура Андрей, Бачинский Владимир и др. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона. // К.: НИИСК, 1987. – С. 25.
2. Бамбура Андрей, Гурковский Александр. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе //

- Міжвід. наук.-техн. зб. Будівельні конструкції. - К.:НДБК, 2003. - № 59. – С. 121-130.
3. Бамбура Андрій, Гурківський Олександр, Безбожна Маріанна, Дорогова Олена Деформаційна модель та алгоритм визначення напружено-деформованого стану розрахункового перерізу залізобетонних елементів// Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. №50. – Днепропетровск., ПГАСА, 2009. – С. 19-25.
 4. Бамбура Андрій, Дорогова Олена Несуча здатність залізобетонних елементів кільцевого перерізу за деформаційною моделлю. // Міжвідомчий науково-технічний зб. Будівельні конструкції. Вип. 73. – Київ: ДП НДБК, 2011. – С. 724-735.
 5. ДБН В.6.2-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення»
 6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування»

УДК 624.046.2

ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ РОЗКРИТТЯ ТРІЩИН В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗГІДНО З НОВИМИ НОРМАТИВНИМИ ДОКУМЕНТАМИ УКРАЇНИ

*Д.т.н.,с.н.с Бамбура А.М., інж. Сазонова І.Р., інж. Канюка Л.Г.
Державне Підприємство „Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій”, м. Київ*

З 1 липня 2011 року в Україні введено в дію нові нормативні документи – ДБН В.2.6-98 «Бетонні та залізобетонні конструкції» [1] та ДСТУ Б В.2.6-156 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону» [2]. При розробленні цих Норм враховані основні принципи EN 1992-1-1:2005 Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій.

За новими Нормами ширина розкриття тріщин залежить від максимального кроку тріщин та різниці між середніми деформаціями в розтягнутій арматурі та бетоні між тріщинами. Ширина тріщин w_k визначається за виразом (5.8) [2]:

$$w_k = s_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{ctm}), \quad \text{де}$$

$s_{r,max}$ - максимальний крок тріщин;

ϵ_{sm} - середні деформації в арматурі при відповідному сполученні навантажень, включно з впливом прикладених деформацій та при врахуванні впливу жорсткості при розтягу. Враховуються тільки додаткові деформації розтягу, що мають місце при деформації бетону на тому ж рівні вище нуля;

ϵ_{ctm} - середня деформація бетону між тріщинами.