

БЛОК-СХЕМИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ПОЛІМЕРНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ, ЗА ДРУГОЮ ГРУПОЮ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ

Запропоновано та розроблено методику розрахунку граничного стану за придатністю до експлуатації (друга група) залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією. Наведено блок-схеми розрахунку залізобетонної балки, підсиленої полімерною композицією проникаючої дії на основі полізоціанату.

Ключові слова: залізобетонна балка, підсилення, полімерна композиція, розрахунок.

Вступ. Нині при реконструкції та відновленні будівель і споруд повсюдно розпочато підсилення залізобетонних конструкцій полімерними матеріалами, зокрема просоченням полімерною композицією проникаючої дії. Після підсилення необхідна перевірка надійності цих конструкцій за граничними станами, але в нормативних документах поряд з іншими розрахунками відсутня методика розрахунку таких конструкцій за граничними станами другої групи. У статті наведено удосконалену методику таких розрахунків та відповідні блок-схеми.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Основні положення норм проектування залізобетонних конструкцій наведено в нормативних документах [1, 2]. В Україні все частіше застосовують полімерну композицію для підсилення бетону. Експериментальні дані [3 – 5] вказують на збільшення значення міцності підсиленого бетону. При цьому за рахунок значних адгезійних властивостей полімерна композиція краще підвищує міцність бетону на розтяг, ніж на стиск [6 – 8].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Відповідно до основних положень норм проектування залізобетонних конструкцій [1, 2] необхідно адаптувати методику розрахунку конструкцій за граничними станами другої групи стосовно залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією.

Метою досліджень є розроблення методики розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за граничними станами з використанням нормативних положень [1, 2] для підсилення конструкцій.

Основний матеріал і результати. Підсилення залізобетонних конструкцій полімерною композицією проникаючої дії на основі полізоціанату полягає в просоченні бетонної поверхні мономером (рідиною), внаслідок чого відбувається зміна фізико-механічних характеристик бетону. Це необхідно врахувати в розрахунках.

Розрахунок підсилених залізобетонних балок за другою групою граничних станів виконувати:

- за утворенням тріщин;
- за розкриттям тріщин;
- за деформаціями (прогинами).

Згідно з експериментальними даними [3 – 5], отриманими при випробуванні різних класів бетону на стиск, значення міцності підсиленого бетону на стиск $f_{ck,p}$ збільшується, але не суттєво. Тому в розрахунках з метою забезпечення надійності підсиленої конструкції значення міцності бетону запропоновано приймати таким, що дорівнює значенню міцності відповідного класу бетону, з якого виготовлено конструкцію [1, табл. 3.1]:

$$f_{ck,p} \approx f_{ck}, \quad (1)$$

де f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск.

Значення початкового модуля пружності підсиленого бетону $E_{ck,p}$ збільшується і повинно прийматися за експериментальними даними, за відсутності даних визначається за формулою

$$E_{ck,p} = p_E \cdot E_{ck}, \quad (2)$$

де $E_{ck,p}$ – значення початкового модуля пружності підсиленого бетону;

p_E – коефіцієнт, що враховує збільшення початкового модуля пружності, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти таким, що дорівнює 1,3;

E_{ck} – характеристичне значення початкового модуля пружності бетону.

Значення відносних деформацій стиску підсиленого бетону $\varepsilon_{c1,p}$ слід приймати згідно з діаграмою стану (деформування), за відсутності діаграми стану (деформування) підсиленого бетону значення відносних деформацій визначається за формулою

$$\varepsilon_{c1,p} = p_\varepsilon \cdot \varepsilon_{c1}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{c1,p}$ – значення відносних деформацій стиску підсиленого бетону при максимальних напруженнях;

p_ε – коефіцієнт, що враховує зменшення відносних деформацій бетону, приймається за експериментальними даними діаграми стану (деформування), за відсутності даних можна прийняти таким, що дорівнює 0,9;

$\varepsilon_{c1,p}$ – характеристичне значення відносних деформацій стиску бетону при максимальних напруженнях.

За експериментальними даними [6–8] встановлено, що за рахунок значних адгезійних властивостей полімерна композиція краще підвищує міцність бетону на розтяг, ніж на стиск. Значення міцності підсиленого бетону на розтяг $f_{ctm,p}$ збільшується, у розрахунках запропоновано приймати за формулою

$$f_{ctm,p} = p_f \cdot f_{ctm}, \quad (4)$$

де $f_{ctm,p}$ – значення міцності підсиленого бетону на осьовий розтяг;

p_f – коефіцієнт, що враховує збільшення міцності бетону на розтяг, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти таким, що дорівнює 1,3;

f_{ctm} – середнє значення міцності бетону на осьовий розтяг.

Розрахунок за утворенням нормальних тріщин залізобетонних балок, підсилені полімерною композицією, виконується за нелінійною деформаційною моделлю на основі діаграм стану арматури розтягнутого та стиснутого бетону, а також гіпотези плоских перерізів. Критерієм утворення тріщин є досягнення граничних відносних деформацій у розтягнутому бетоні $\varepsilon_{ctu,p}$ на рівні нижнього шару робочої арматури

$$\varepsilon_{ctu,p} = -2f_{ctm,p}/E_{ck,p}, \quad (5)$$

де $\varepsilon_{ctu,p}$ – значення відносних граничних деформацій розтягу підсиленого бетону;

$E_{ck,p}$ – значення початкового модуля пружності підсиленого бетону.

Момент тріщиноутворення M_{cr} , виходячи з деформаційної моделі для елементів прямокутного профілю з одиничним армуванням, визначається за формулою

$$M_{cr} = f_{ck} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c1,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k + f_{ctm,p} b (h-x)^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{sr,p}}{\varepsilon_{ctu,p}} \right)^k + E_s A_s \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c)^2, \quad (6)$$

де M_{cr} – момент утворення перших тріщин;

b – ширина перерізу;

h – загальна висота перерізу;

x – висота стиснутої зони перерізу;

c – захисний шар бетону для арматури;

a_k – коефіцієнти поліноміальної залежності;

$\varepsilon_{cl,p}$ – значення відносних деформацій стиску бетону в перерізі «без тріщин»;

$\varepsilon_{cl,p}$ – значення відносних деформацій стиску бетону при максимальних напруженнях;

$\varepsilon_{sr,p}$ – значення відносних деформацій розтягу бетону в перерізі «без тріщин»;

E_s – початковий модуль пружності арматури;

A_s – площа поперечного перерізу арматури.

Знаходження моменту тріщиноутворення M_{cr} здійснюється методом простої ітерації або методом послідовних наближень. Ураховуючи напружено-деформований стан залізобетонного елемента прямокутного перерізу (рис. 1, а) та використовуючи гіпотезу плоских перерізів, можна записати

$$\varepsilon_{sr,p} = \varepsilon_{sI} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cI,p} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} x. \quad (8)$$

Для визначення $\varepsilon_{cl,p}$ та $\varepsilon_{sl,p}$ необхідно знайти висоту стиснутої зони бетону x . Вона розраховується, виходячи з умови рівноваги внутрішніх зусиль у перерізі. Використовуючи деформаційну модель у вигляді полінома п'ятого степеня [1], умову можна записати у такому вигляді:

$$f_{ck} b x \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{cI,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k = f_{ctm,p} b (h-x) \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{sr,p}}{\varepsilon_{ctu,p}} \right)^k + E_s A_s \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c). \quad (9)$$

За допомогою залежностей (7) та (8), попередньо задаючись величиною x , методом послідовних наближень досягаємо виконання умови рівноваги внутрішніх зусиль у перерізі (9) з точністю до 2%. У першому наближенні приймається $x = 0,5d$ і надалі змінюється до виконання умови рівноваги в межах $\pm 2\%$.

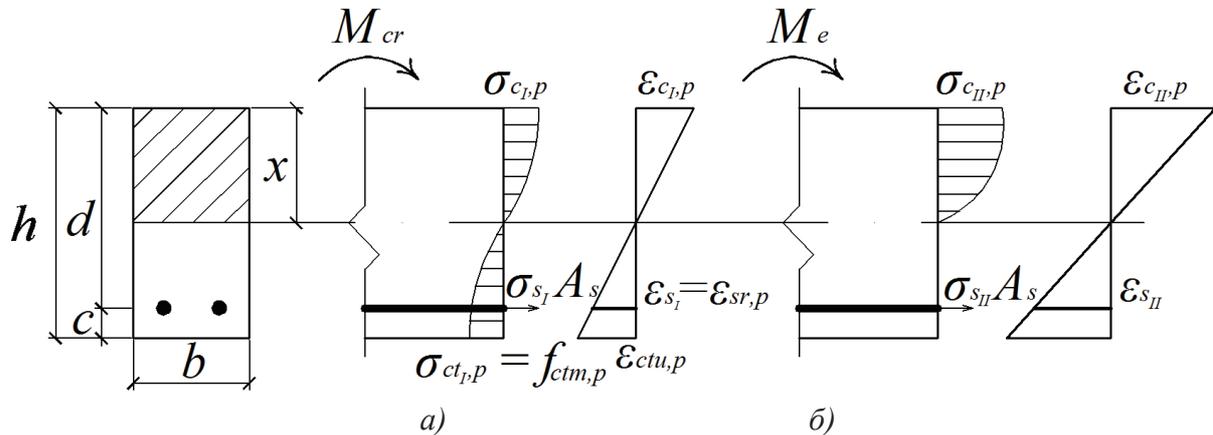


Рисунок 1 – Напружено-деформований стан залізобетонного елемента в граничному стані «без тріщин» (а), «з тріщинами» (б)

Блок-схема розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за утворенням тріщин наведена на рисунку 2.

Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям нормальних тріщин виконується з умови [1]

$$W_k \leq W_{k,lim} \quad (10)$$

за якою ширина розкриття тріщин від зовнішнього навантаження w_k не повинна перевищувати гранично допустимого значення ширини розкриття тріщин $w_{k,lim}$, наведеного в п. 5 [2].

Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям нормальних тріщин виконується за формулою

$$w_k = p_w \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctu})_p, \quad (11)$$

де p_w – коефіцієнт, що враховує зменшення ширини розкриття тріщин у підсилених конструкціях, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти таким, що дорівнює 0,8;

$s_{r,max}$ – максимальний крок між тріщинами;

ε_{sm} – середні деформації в арматурі при відповідному сполученні навантажень;

ε_{ctu} – середні деформації розтягнутого бетону між тріщинами.

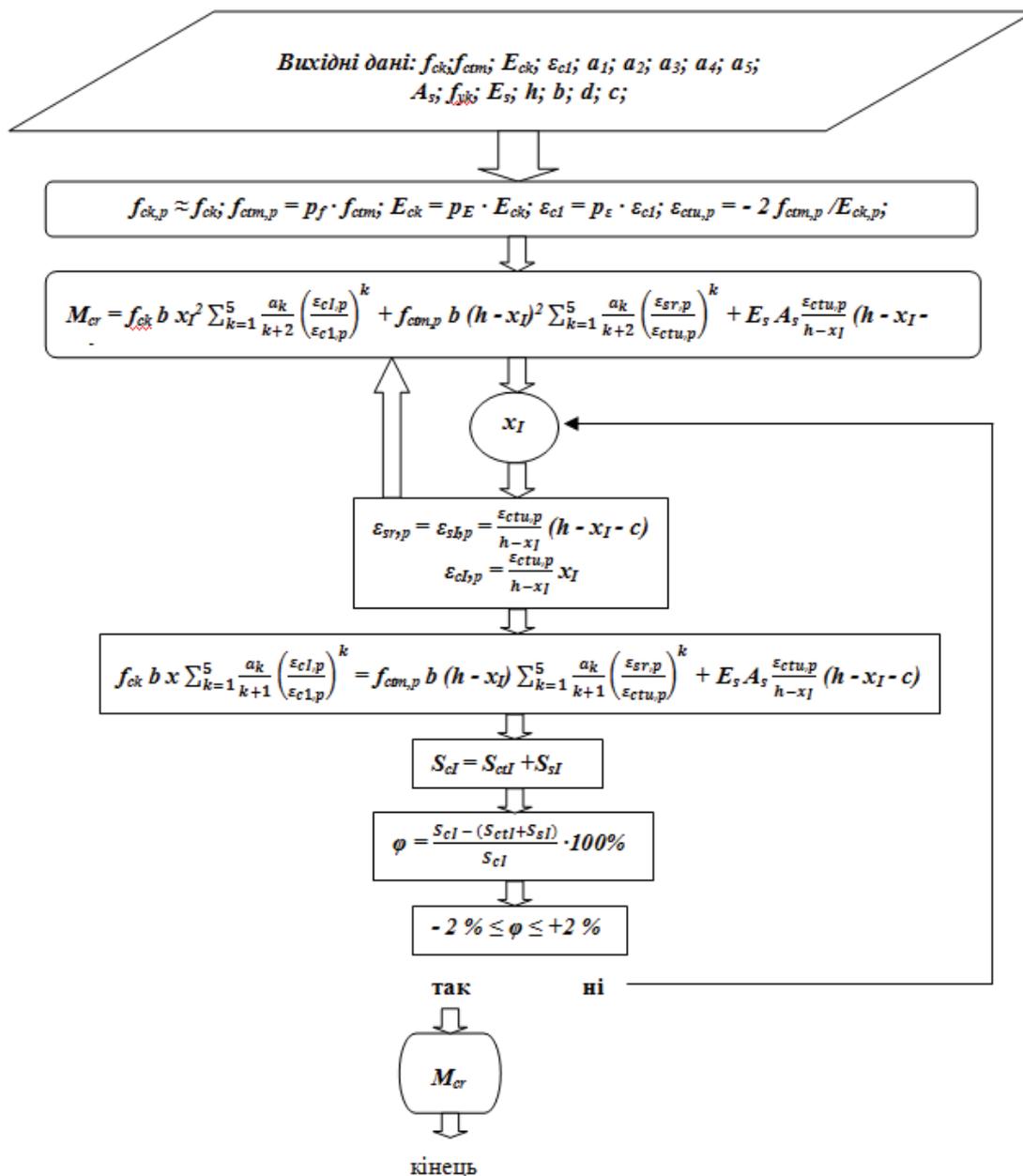


Рисунок 2 – Блок-схема розрахунку за утворенням тріщин

Максимальний крок між тріщинами визначається за формулою

$$\sigma_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2\sigma/\rho_{p,eff}, \quad (12)$$

де c – захисний шар бетону для поздовжньої арматури;

k_1 – коефіцієнт, що враховує характеристики зчеплення арматури, який таким, що дорівнює 0,8 (для стрижнів із високим зчепленням) і 1,6 (для стрижнів із фактично гладкою поверхнею);

k_2 – коефіцієнт, що враховує розподіл деформацій: 0,5 (для згину) і 1,05 (для чистого розтягу);

σ – діаметр стрижня;

$\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$ – ефективний коефіцієнт армування;

A_s – площа розтягнутої арматури в межах фактичної площі бетону;

$A_{c,eff}$ – фактична площа розтягнутого бетону [2, п. 5].

Третій параметр у рівнянні (11) – середня величина деформацій $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}$ визначається за формулою

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}(1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{\rho_{p,eff}}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (13)$$

де σ_s – напруження у розтягнутій арматурі в перерізі «з тріщиною»;

k_t – коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження: 0,6 (для короткотривалого); 0,4 (для довготривалого);

$f_{ct,eff}$ – середня величина міцності бетону на розтяг, що має місце в момент часу, коли очікується поява тріщин, $f_{ct,eff} = f_{ctm,p}$.

Напруження в арматурі σ_s , яке розраховується для перерізу «з тріщиною», за дії експлуатаційного моменту M_e визначається за формулою

$$\sigma_s = \varepsilon_{sl,p} E_s. \quad (14)$$

Для знаходження σ_s розглядаємо переріз «з тріщиною» (рис. 1, б): у цьому стані невідомі висота стиснутої зони перерізу x , значення відносних деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cl,p}$ та значення відносних деформацій розтягнутої арматури $\varepsilon_{sl,p}$. Методом простої ітерації (послідовних наближень) за допомогою ЕОМ знаходимо ці параметри за формулою [9]

$$M_e = f_{ck} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{cl,p}}{\varepsilon_{cl,p}} \right)^k + \varepsilon_s E_s A_s (d - x). \quad (15)$$

Задаючи значення відносних деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cl,p}$ від 0 до $\varepsilon_{cl,p}$ через інтервал $0,1\varepsilon_{cl,p}$, визначаються відповідні величини відносних деформацій розтягнутої арматури (за гіпотезою плоских перерізів)

$$\varepsilon_{sl,p} = \frac{\varepsilon_{cl,p}}{x} (d - x), \quad (16)$$

при цьому повинна виконуватися умова [9]

$$f_{ck} b x \sum_{k=1}^5 \frac{\alpha_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{cl,p}}{\varepsilon_{cl,p}} \right)^k = \varepsilon_s E_s A_s. \quad (17)$$

За отриманими даними аналітично або графічно при величині експлуатаційного моменту M_e знаходимо $\varepsilon_{sl,p}$ та визначаємо σ_s .

Блок-схема розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям тріщин наведена на рисунку 3.

Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за деформаціями визначається за загальними правилами будівельної механіки. Прогини балок в основному залежать від згинальних деформацій, тому значення прогинів можна встановити за кривизною балки. Кривизна та поздовжні деформації залізобетонних балок, підсилених

полімерною композицією, визначаються за нелінійною деформаційною методикою, виходячи з рівнянь рівноваги зовнішніх зусиль, які діють у нормальному перерізі балки, гіпотези плоских перерізів, діаграм стану бетону та арматури, за формулою [10]

$$N = \xi N_{II,p} + (1 - \xi) N_{I,p}, \quad (18)$$

де N – загальна кривизна балки;

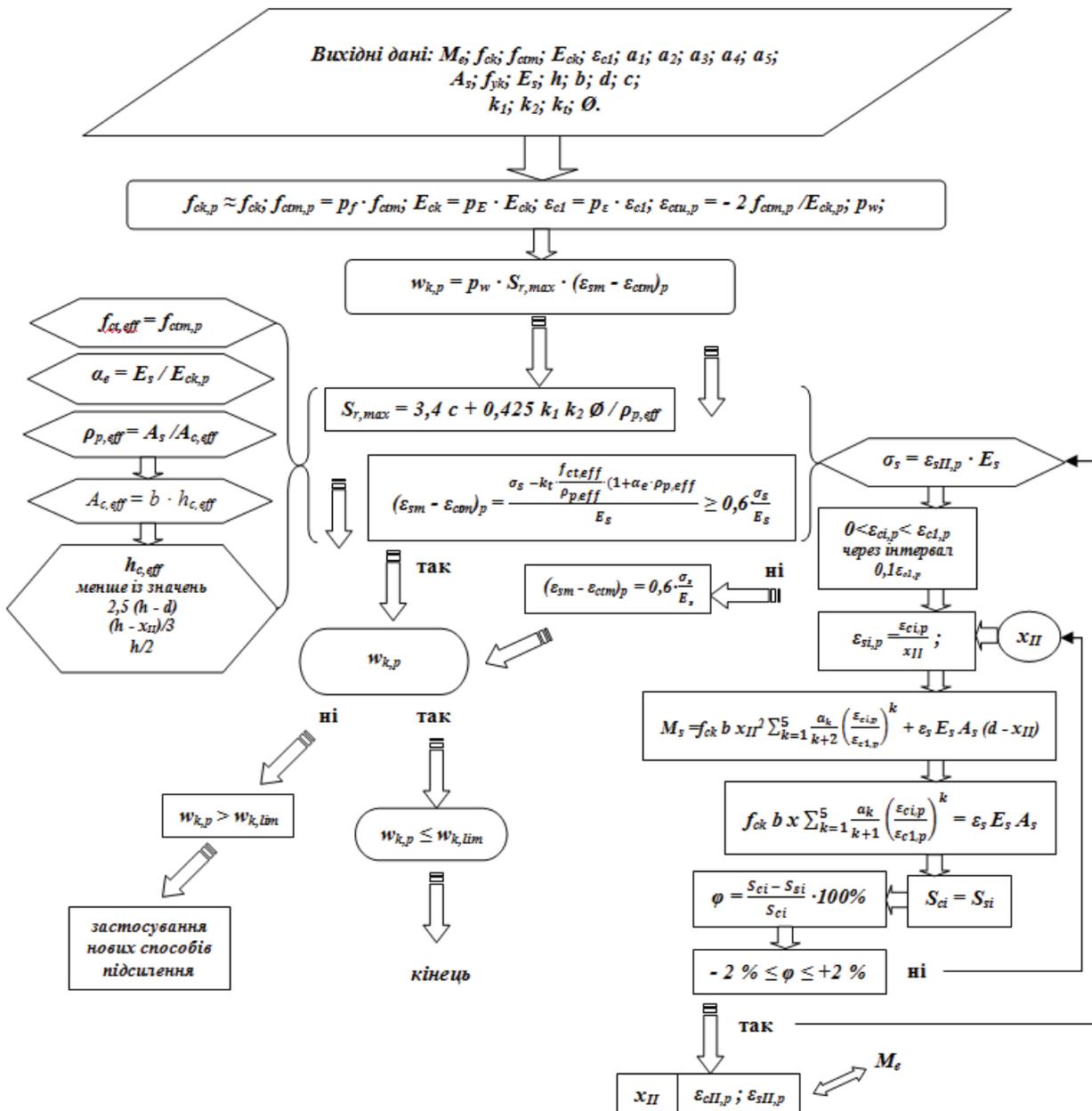


Рисунок 3 – Блок-схема розрахунку за розкриттям тріщин

ξ – коефіцієнт розподілення, визначається за формулою

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{SR}}{\sigma_s} \right)^2, \quad (19)$$

де β – коефіцієнт, що враховує вплив на середню відносну деформацію тривалості навантаження або повторності навантаження: 1,0 (для одноразового короточасного навантаження); 0,5 (для постійних чи багатьох циклів повторних навантажень);

σ_{sr} – напруження в розтягнутій арматурі, котре розраховується для перерізу «без тріщини» за умови навантаження в момент утворення першої тріщини;

σ_s – напруження в розтягнутій арматурі, котре розраховується для перерізу «з тріщиною»;

$N_{I,p}$ – кривизна балки «без тріщини»;

$N_{II,p}$ – кривизна балки «з тріщиною».

Напруження в арматурі σ_{sr} , яке розраховується для перерізу «без тріщини», визначається за формулою

$$\sigma_{sr} = \varepsilon_{sI,p} E_s \quad (20)$$

Кривизна балки «без тріщини» визначається за формулою

$$N_{I,p} = \frac{\varepsilon_{cI,p} + \varepsilon_{sI,p}}{d}, \quad (21)$$

де d – робоча висота поперечного перерізу балки.

Визначення значень $\varepsilon_{cI,p}$ та $\varepsilon_{sI,p}$ виконуємо за формулами (7), (8) і досягаємо виконання умови рівноваги (9) в межах $\pm 2\%$.

Для знаходження кривизни балки «з тріщиною» $N_{II,p}$ за дії експлуатаційного згинального моменту в перерізі M_e визначаємо $\varepsilon_{cII,p}$ та $\varepsilon_{sII,p}$. Для цього розглядаємо переріз «з тріщиною» (рис. 1, б): у цьому стані невідомі висота стиснутої зони перерізу x , значення відносних деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cII,p}$ і значення відносних деформацій розтягнутої арматури $\varepsilon_{sII,p}$. Методом простої ітерації (послідовних наближень) за допомогою ЕОМ знаходимо ці параметри за формулою (15).

Задаючи значення відносних деформацій стиснутого бетону $\varepsilon_{cI,p}$ від 0 до $\varepsilon_{cI,p}$, через інтервал $0,1\varepsilon_{cI,p}$, визначаємо відповідні величини відносних деформацій розтягнутої арматури $\varepsilon_{sI,p}$ за формулою (16), при цьому повинна виконуватися умова (17).

Кривизна балки «з тріщиною» визначається за формулою

$$N_{II,p} = \frac{\varepsilon_{cII,p} + \varepsilon_{sII,p}}{d}. \quad (22)$$

Прогин статично визначних балок обчислюється за формулою

$$f = Nk_m l^2, \quad (23)$$

де N – загальна кривизна балки;

k_m – коефіцієнт, що залежить від характеру навантаження, визначається за табл. 5.5 [2];

l – розрахунковий проліт балки.

Блок-схема розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за деформаціями наведена на рисунку 4.

Висновки. Розроблені блок-схеми розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за другою групою граничних станів дають практичну можливість використання нормативних положень [1, 2] для підсилення конструкцій.

Література

9. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
10. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
11. Бабиц Є.М. Вплив полімерної композиції «Силор» на міцність, деформативність та тріщиностійкість залізобетонних балок при дії статичних навантажень / Є.М. Бабиц, В.С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. 18. – С. 442 – 448.

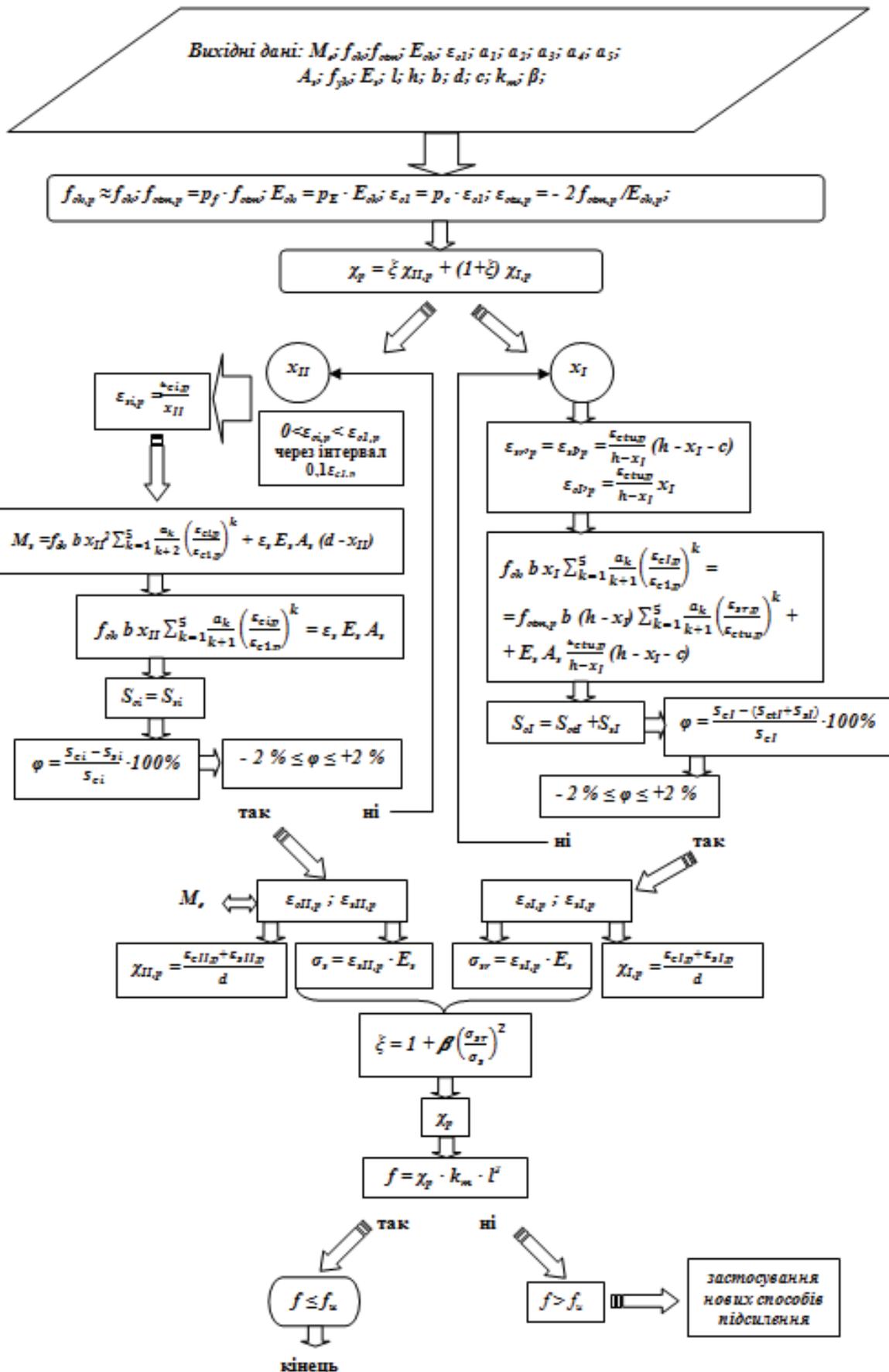


Рисунок 4 – Блок-схема розрахунку за деформаціями

12. Бабич Є.М. Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією / Є.М. Бабич, В.С. Довбенко // *Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб.* – Харків: ХНАМГ, 2011. – Вип. 101. – С. 7 – 14.
13. Довбенко В.С. Дослідження роботи залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією при дії малоциклових навантажень / В.С. Довбенко // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць.* – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 787–794.
14. Бабич Е.М. Трециностойкость усиленных железобетонных балок / Е. М. Бабич, В. С. Довбенко // *Вестник Белорусско-Российского университета.* – № 1(42). – Республика Беларусь, Могилев: Белорусско-Российский университет, 2014. – С. 117–125.
15. Довбенко В.С. Дослідження полімерної композиції «Силор» як ефективного засобу ремонту, відновлення та підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій / В. С. Довбенко // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць.* – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20. – С. 181–186.
16. Довбенко В.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных полимерной композицией / В.С. Довбенко // *Строительство и архитектура: науч.-техн. журнал №1 (51).* – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – 2014. – С. 22–28.
17. Бабич Є.М. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із використанням деформаційної моделі: рекомендації / Є.М. Бабич, В.Є. Бабич, В.В. Савицький. – Рівне: НУВГП, 2005. – 38 с.
18. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. – Brussels-2004, December. – 225 p.

*Е.М. Бабич, д.т.н., профессор
В.С. Довбенко, ст. преподаватель*

Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно

БЛОК-СХЕМЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ, ПО ВТОРОЙ ГРУППЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Предложена и разработана методика расчета предельного состояния по пригодности к эксплуатации (вторая группа) железобетонных балок, усиленных полимерной композицией. Приведены блок-схемы расчета железобетонной балки, усиленной полимерной композицией проникающего действия на основе полиизоцианата.

Ключевые слова: железобетонная балка, усиление, полимерная композиция, расчет.

*Y.M. Babich, doctor of technical sciences, professor
V.S. Dovbenko, senior lecturer*

National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne

THE BLOCK SCHEMATIC DIAGRAMS FOR CALCULATING OF CONCRETE BEAMS, REINFORCED WITH POLYMER COMPOSITE BY SERVICEABILITY LIMIT STATES

There was proposed and devised an accounting treatment of serviceability limit states of concrete beams reinforced with the help of the polymer composite. There were given the block schematic diagrams for calculation of concrete beam reinforced with the help of the polymer composite of penetrating action on the basis of polyisocyanate.

Keywords: concrete beam, reinforcement, polymer composite, calculation.

Надійшла до редакції 21.09.2014

© Є.М. Бабич, В.С. Довбенко