

## ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ КРУЧЕННІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ТРІЩИНАМИ

**Роландо Перейрас, аспірант, Аюб Рауді, студ. гр. ПЦБ-622м(н)**

*Науковий керівник – Азізов Т.Н., д.т.н., професор (кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд, Одеська державна академія будівництва та архітектури)*

**Анотація.** Наведено методику і алгоритм розрахунку жорсткості залізобетонних елементів за дії крутних моментів. Показано простий спосіб врахування нелінійних властивостей бетону при зсуві. При цьому діаграма зсуву бетону прийнята у вигляді діаграми Прандтля. Розвинуто методику нелінійного розрахунку на елементи з нормальними тріщинами.

**Аналіз досліджень і постановка задачі.** Відомо, що просторова робота залізобетонних перекриттів, мостів та інших систем, що деформуються просторово, залежить від згинальної та крутильної жорсткостей їх окремих елементів [1, 5].

У залізобетонних елементах на згинальну і крутильну жорсткість суттєво впливають різні тріщини. Що стосується впливу нормальних тріщин, то цей вплив на згинальну жорсткість вивчений достатньо повно. Але вплив нормальних тріщин на зміну крутильних жорсткостей залізобетонних стрижневих елементів мало вивчений. В літературі розрахунки крутильної жорсткості передбачають наявність просторових тріщин [8, 10].

Вивчення впливу нормальних тріщин на крутильну жорсткість залізобетонних стрижневих елементів присвячені роботи, виконані в Одеській державній академії будівництва та архітектури під керівництвом Т.Н. Азізова [2, 3, 11]. В цих та інших роботах розглянуті різні перерізи (прямокутні, таврові, двотаврові, коробчасті), вплив висоти нормальної тріщини, кількості поздовжньої арматури. Однак, в цих роботах не враховано вплив нелінійних властивостей бетону на крутильну жорсткість залізобетонних елементів з нормальними тріщинами. Виключенням є експериментальна робота Н.Р. Вільданової [7], в якій отримана нелінійна діаграма зсуву бетону.

В роботах [5, 9] для оцінки нелінійних властивостей при визначенні крутильної жорсткості елементів введено коефіцієнт, який враховував зменшення початкової жорсткості на кручення і визначався на основі експериментальних даних (при чому дослідники виводили доволі різні формули для визначення цього коефіцієнта):

$$B = k\bar{B} \quad (1)$$

де  $\bar{B}$  – початкова (пружна) жорсткість.

Т.Н.Азізов [1], запропонував наближену методику оцінки нелінійних властивостей при визначенні крутильної жорсткості залізобетонних елементів:

$$B_t = \left(1 - \frac{M_t}{M_{t,u}}\right) B_0 \leq B_0 \quad (2)$$

де  $B_0$  – початкова (пружна) жорсткість;  $M_t$ ,  $M_{t,u}$  – відповідно поточний та граничний крутні моменти. Однак ця формула поки що експериментально не підтверджена.

В роботі [12] теоретично отримано діаграму зсуву бетону, а в роботі [6] перевірено її експериментально. Однак, практична методика розрахунку з врахуванням наявності нормальних тріщин та нелінійних властивостей бетону не розроблена.

З огляду на вищесказане, **метою даної статті** є розроблення методики визначення жорсткості при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами і без них з врахуванням нелінійних властивостей бетону при зсуві.

**Викладення основного матеріалу.** Наведена вище формула (2) добре описує нелінійну роботу при крученні на етапах навантаження, близьких до максимального (65-95% від

руйнівного). В той же час експериментальні дослідження, проведені в Одеській державній академії будівництва та архітектури [2, 3, 11], показали, що елементи з одиночним поздовжнім армуванням з нормальними тріщинами до достатньо високих рівнів навантаження (до 60% і більше від руйнівного) деформуються при крученні практично лінійно. Тому, з одного боку можна до цих рівнів навантаження розраховувати як пружний елемент, а після цього застосовувати формулу (2). Однак, це повинно бути перевірено експериментально. З іншого боку, можна розглянути методику нелінійного розрахунку, основи якої запропоновано в [13] з розвитком її на елементи з нормальними тріщинами. При цьому нелінійні властивості бетону при зсуві теоретично будуть враховані на всіх стадіях роботи елемента.

Розглянемо нормальний переріз стрижневого елемента, на який діє крутний момент. Для простоти пояснення поки що розглядатимемо переріз без наявності арматури. Врахування арматури проводиться як прийнято для розрахунку залізобетонних елементів на згин множенням площі елементів арматури на коефіцієнт приведення, рівний відношенню модуля пружності арматури до модуля пружності бетону. Крім того, розглянемо для простоти пояснення методики прямокутний переріз. Елементи будь-якого іншого перерізу можуть бути розраховані з використанням наведеного нижче способу.

Розіб'ємо поперечний переріз на  $n$  прямокутників (рис. 1).

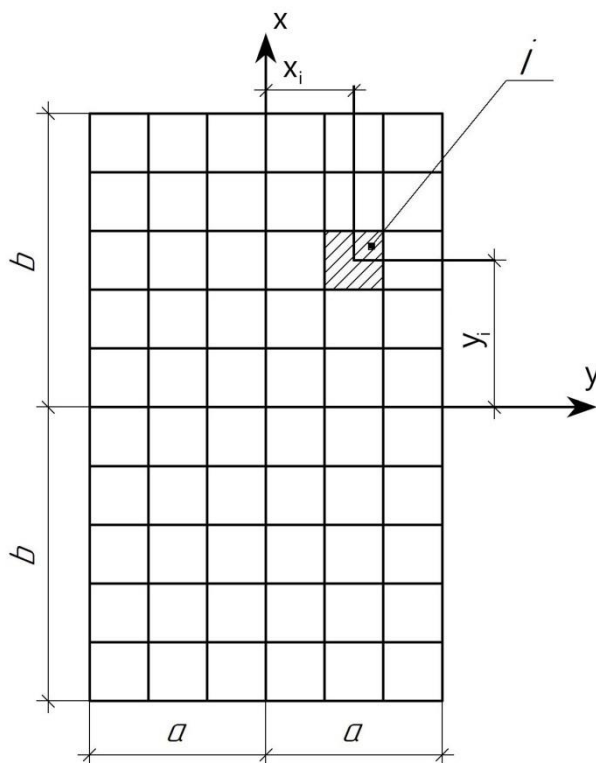


Рис. 1. Схема поділу поперечного перерізу на окремі прямокутні елементи

Центр крутіння поперечного перерізу визначити нескладно. В кожному прямокутному елементі діють зусилля  $T_{yz,i}$  та  $T_{xz,i}$ , рівні добутку дотичного напруження на площу цього елемента. Якщо відомий розподіл дотичних напружень по перерізу  $\tau_{yz,i}$  и  $\tau_{xz,i}$ , то неважко визначити дотичні зусилля і крутний момент в перерізі (див. рис. 1):

$$M_t = \sum_{i=1}^n (T_{yz,i} X_i + T_{xz,i} Y_i) \quad (3)$$

З іншого боку крутний момент  $M_t$  визначається за відомою формулою теорії крутіння [5]:

$$M_t = D \cdot \theta \quad (4)$$

де  $D$  – жорсткість перерізу при крученні;  $\theta$  – відносний кут закручування.

Якщо прийняти діаграму зсуву бетону у вигляді діаграми Прандтля, то алгоритм визначення крутильної жорсткості буде виглядати:

1. Задамося довільним значенням відносного кута закручування  $\theta_1$ ;
2. Визначимо пружний момент  $M_t$ , який відповідає даному куту  $\theta_1$  з формули (4);
3. За відомими формулами теорії крутіння визначимо дотичні напруження  $\tau_{yz,i}$  та  $\tau_{xz,i}$  в кожному прямокутному елементі;
4. Визначаємо максимальні значення дотичних напружень  $\tau_{yz,i,max}$  та  $\tau_{xz,i,max}$ ;
5. Визначаємо для кожного елемента коефіцієнти  $k_{yz,i} = \tau_{yz,i} / \tau_{yz,i,max}$  та  $k_{xz,i} = \tau_{xz,i} / \tau_{xz,i,max}$ ;
6. Визначаємо суму усіх коефіцієнтів  $k_{yz,i}$ , значення яких менше одиниці

$k_{tot,y} = \sum_{j=1}^n k_{yz,j}$ ;  $k_{tot,x} = \sum_{j=1}^m k_{xz,j}$ , де  $n, m$  – кількість елементів, в яких напруження перевищують граничні відповідно  $\tau_{yz,i}$  та  $\tau_{xz,i}$ ;

7. Якщо в якомусь елементі дотичні напруження більші граничних  $\tau_i > [\tau]$ , то напруження в цьому елементі приймаємо рівними  $[\tau]$ ;

8. Визначаємо величину «зайвих» моментів в кожному елементі, в якому напруження перевищують граничні:  $\Delta M_{y,i} = (\tau_{yz,i,max} - \tau_{yz,i}) \cdot A \cdot X_i$ ;  $\Delta M_{x,i} = (\tau_{xz,i,max} - \tau_{xz,i}) \cdot A_i \cdot Y_i$ ;

9. Визначаємо сумарні «зайві» моменти  $M_{e,y} = \sum_{k=1}^n \Delta M_{y,k}$  та  $M_{e,x} = \sum_{k=1}^m \Delta M_{x,k}$ , де  $n, m$  – те ж саме, що і в п. 6;

10. Розподіляємо «зайві» моменти між елементами, в яких  $k_{yz,i}$  та  $k_{xz,i}$  менші одиниці пропорційно цим коефіцієнтам  $M_{y,i} = \frac{M_{e,y}}{k_{tot,y}} k_{yz,i}$ ;  $M_{x,i} = \frac{M_{e,x}}{k_{tot,x}} k_{xz,i}$ ;

11. Визначаємо нові значення дотичних напружень в елементах, в яких на першій ітерації напруження були менші граничних:  $\tau_{xz,i}^r = \tau_{xz,i} + \frac{M_{x,i}}{A_i Y_i}$ ;  $\tau_{yz,i}^r = \tau_{yz,i} + \frac{M_{y,i}}{A_i X_i}$ ;

12. Повторюємо розрахунок з пункту 6. Таким чином ми отримаємо кінцевий розподіл дотичних напружень.

При відомих значеннях напружень у всіх елементах визначаємо дотичні зусилля  $T_{yz,i}$  та  $T_{xz,i}$  множенням відповідних напружень на площу елемента. Далі за формулою (3) визначаємо крутий момент  $M_t$ , який буде відрізнятись від початкового  $M_{t,e}$ .

Таким чином, ми отримаємо значення крутного моменту, який відповідає заданому у п.1 відносному куту закручування. Далі, змінюючи значення кута  $\theta = \theta_2, \theta = \theta_3, \dots, \theta = \theta_k$ , отримаємо діаграму «крутий момент-кут закручування» (діаграму « $M_t - \theta$ »). З цієї діаграми не важко визначити значення кута закручування при дії реального крутного моменту, а також жорсткість при крученні, яка відповідає цьому моменту.

Несуча здатність стрижня буде визначатися у верхній точці діаграми « $M_t - \theta$ ».

Якщо елемент має нормальну тріщину, то розподіл дотичних напружень в області, де немає тріщини, слід проводити за вищенаведеним алгоритмом з такими змінами. Крутий момент визначається як різниця між зовнішнім моментом та моментом, який сприймає нагельна сила  $Q$  в поздовжній арматурі, яка визначається за методикою автора цієї статті [4]. Дотичні напруження  $\tau_{Mt}$  від цього крутного моменту визначаються як напруження прямокутного елемента, ширина якого дорівнює ширині заданого елемента, а висота – висоті зони без тріщин. Дотичні напруження  $\tau_Q$  від дії нагельної сили  $Q$  визначаються діленням величини цієї сили на площу зони бетону без тріщин. Сумарні напруження  $\tau = \tau_{Mt} + \tau_Q$  порівнюються з граничними  $[\tau]$  і розрахунок ведеться за алгоритмом, який наведено вище.

**Висновки та результати.** На основі принципів, викладених у [13], розроблено практичний алгоритм визначення жорсткості при крученні залізобетонного елемента прямокутного перерізу з врахуванням нелінійних властивостей бетону при зсуві. Методика вдосконалена і розвинута на елементи, в поперечному перерізі яких є нормальна тріщина. Розроблений алгоритм дозволяє визначити жорсткість елемента як з тріщинами, так і без тріщин при заданому значенні зовнішнього крутного моменту. При цьому розроблений алгоритм передбачає застосування діаграми Прандтля зсуву бетону, що в принципі допустимо

з огляду на експериментальні дослідження [7].

В перспективі передбачається розвиток методики з використанням криволінійної діаграми зсуву бетону.

### Література:

1. Азизов Т.Н. Жесткость железобетонных элементов при кручении и ее влияние на пространственную работу мостов. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Збірник наукових праць. НАН України. Фізико-мех.інститут ім. В.Г. Карпенка. Львів, 2009. С. 576-590.

2. Азизов Т.Н., Вільданова Н.Р. Експериментальне дослідження діаграми зсуву бетону. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 50. Одеса: ОДАБА, 2013. С. 3-8.

3. Азизов Т.Н., Парамонов Д.Ю. Расчет прочности при кручении железобетонных элементов с нормальными трещинами с применением диаграммы деформирования бетона. Проблемы современного бетона и железобетона. Матер. III международного симпозиума (Минск, 9-11.11.2011). Том. 1. С. 20-24.

4. Азизов Т.Н. Перейрас Роландо Крутильна жорсткість залізобетонних елементів з полицею в розтягненій зоні за наявності нормальних тріщин. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 40. Рівне: Нац. ун-т водного господарства та природокористування, 2021. С. 62-72.

5. Айвазов Р.Л. Жесткость железобетонных панелей на кручение и ее влияние на напряженно-деформированное состояние сборной плиты, опертой по контуру: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» М., 1980. 22 с.

6. Арутюнян Н.Х., Абрамян Б.Л. Кручение упругих тел. М: Гос. Издательство физико-математической литературы, 1963. 686 с.

7. Вільданова Н.Р. Модуль зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності і його вплив на крутильну жорсткість залізобетонних елементів: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». Одеса, 2015. 214 с.

8. Карпенко, Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М.: Стройиздат, 1976. 208 с.

9. Карабанов Б.В. Практический способ расчета железобетонной балки коробчатого сечения на кручение. Бетон и железобетон. 1994. № 3. С. 13-17.

10. Коуэн, Г.Дж. Кручение в обычном и предварительно напряженном железобетоне: Пер. с англ. М.: Изд-во литературы по строительству, 1972. 104 с.

11. Срібняк Н.М. Крутильна жорсткість залізобетонних елементів перекриттів з нормальними тріщинами: автореф. дис. канд. техн. наук 05.23.01. Срібняк Наталія Миколаївна; Одеська державна академія будівництва та архітектури. О., 2009. 23 с.

12. Яременко О.Ф., Школа Ю.О. Несуча здатність та деформативність залізобетонних стержневих елементів в складному напруженому стані. Одеса: ОДАБА, 2010. 136с.

13. Azizov, T., Kochkarev, D., Galinska, T. Reinforced Concrete Rod Elements Stiffness Considering Concrete Nonlinear Properties. (2020). Lecture Notes in Civil Engineering, 47, pp.1-6.