

УДК 624.012.35:620.173/174

ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ТА КОНСТРУКЦІЯХ ЗА ЗАГАЛЬНОЮ МОДЕЛЛЮ ЇХ ДЕФОРМУВАННЯ

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И КОНСТРУКЦИЯХ ЗА ОБЩЕЙ МОДЕЛЬЮ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

CRACK FORMATION IN REINFORCED-CONCRETE ELEMENTS AND CONSTRUCTIONS ACCORDING TO THE GENERAL MODEL OF THEIR DEFORMATION

Ромашко В.М., к.т.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Ромашко В.Н., к.т.н., доц. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)

Romashko V. N., Ph. D. in Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Recourses Use, Rivne)

В рамках загальної теорії деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій сформована розрахункова модель утворення нормальних тріщин. Запропонована методика визначення їх кроку залежно від напружено-деформованого стану

В рамках общей теории деформирования бетонных и железобетонных элементов и конструкций сформирована расчетная модель образования нормальных трещин. Предложена методика определения расстояния между ними в зависимости от напряженно-деформированного состояния

The calculation model of normal cracks formation is formed in the general theory of concrete and reinforced concrete structures deformation. The method of distance-finding between them depending on the stress-strain state is offered

Ключові слова:

Деформування, кривина, тріщини, відстань, модель

Деформирование, кривизна, трещины, расстояние, модель

Deformation, curvature, crack, distance, model

Постановка проблеми. Сучасний розвиток теорії бетону і залізобетону характеризується переходом від силової до так званої «деформаційної»

моделі в проектуванні бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій. Реалізується він в основному шляхом використання у розрахунках гіпотези плоских перерізів та повних діаграм деформування матеріалів. Звісно, що такий перехід повинен був би забезпечити:

- більш точне відображення дійсного напружено-деформованого стану залізобетонних елементів і конструкцій на всіх стадіях їх деформування;
- максимальне уникнення емпіризму в методиках їх розрахунку, особливо за 2-ю групою граничних станів;
- методологічну єдність розрахунків за обома групами граничних станів.

Однак, як показує практика, у більшості випадків використання повних діаграм деформування бетону не стільки підвищує точність розрахунків скільки ускладнює їх. Що ж до уникнення емпіризму та методологічної єдності розрахунків, то суттєвої відмінності між силовою і деформаційною моделями наразі не досягнуто.

Просте застосування в «деформацій моделі» гіпотези плоских перерізів без її відповідного корегування, багато в чому урівнює її з силовою моделлю, не забезпечує бажаного відходу від емпіризму у розрахунках за 2-ю групою граничних станів та не відповідає дійсному напружено-деформованому стану залізобетонних елементів і конструкцій після утворення в них тріщин.

Тому цілком очевидно, що актуальність всіх трьох перерахованих вище задач в теорії бетону і залізобетону буде зберігатися ще тривалий час. Ефективність же їх вирішення в значній мірі залежатиме від точності відображення в розрахункових моделях деформування залізобетонних елементів і конструкцій процесів тріщиноутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Явище утворення тріщин в залізобетонних елементах і конструкціях у різний час вивчали Мурашев В.І. [1], Берг О.Я. [2], Немировський Я.М. [3], Портер Е.Г. [4], Молодченко Г.А. [5], Карпенко М.І. [6], Холмянський М.М. [7], Городецький Л.М. [8], Гаттас А.Ф. [9], Бондаренко В.М. і Колчунов В.І. [10] та інші. Завдяки їхнім дослідженням було встановлено, що відстань між нормальними тріщинами:

- визначається за рівновагою різниці зусиль в арматурі у перерізах з тріщинами і без них та зусиль зчеплення арматури з бетоном;
- в найбільшій мірі пов'язана з площею розтягнутого бетону, обмеженого зовнішнім контуром перерізу і величиною радіуса взаємодії, та діаметром арматурних стержнів;
- загалом є залежною від граничних деформацій розтягнутого бетону;
- пропорційна товщині захисного шару бетону та відношенню площі бетону до периметру арматури;
- певним чином пов'язана з усередненими розрахунковими значеннями граничних напружень зчеплення арматури з бетоном, що залежать від напружень в самій арматурі;
- залежить від рівнів тріщиноутворення, що характеризуються порушенням сумісності деформацій бетону і арматури.

При цьому, переважній більшості отриманих аналітичних залежностей, пов'язаних з процесами тріщиноутворення, властиві чисто емпіричний характер або переобтяженість різними емпіричними коефіцієнтами. Тому й не дивно, що останнім часом появляються роботи, автори яких стараються повністю або максимально позбутися зазначеного недоліку [11, 12]. Але вони теж мають обмежене застосування, оскільки в своїй основі прив'язані до конкретного виду напружено-деформованого стану залізобетонного елемента. Крім того, із-за надто вільного застосування основних гіпотез та простих неточностей, пов'язаних з визначенням окремих параметрів тріщиноутворення, у тому числі і усереднених розрахункових значень граничних напружень зчеплення арматури з бетоном, отримані рішення загалом не можуть претендувати на універсальність.

Виділення питань, не вирішених в рамках загальної проблеми. Незважаючи на вищеперераховані досягнення в теорії бетону і залізобетону, унормована нині методика розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій [13] недалеко відійшла від позицій колишньої силової моделі, так і не позбувшись її основних недоліків.

Більше того, в діючих нормах ніяким чином не відображена якісна різниця між параметрами зчеплення арматури з бетоном до та після утворення тріщин. З цієї причини, очевидно, відсутні будь-які рекомендації з визначення відстані між тріщинами як величини, що дискретно змінюється протягом всього процесу деформування залізобетонного елемента [10].

Звісно, що загальне вирішення зазначених задач не може бути знайдене за допомогою лише силових або тільки деформаційних параметрів. Його слід шукати за комплексного використання цих параметрів в узагальненій моделі деформування залізобетонних елементів і конструкцій.

Мега статті. Дана стаття направлена на розробку розрахункової моделі утворення тріщин в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях у рамках загальної теорії їх деформування. Тому одним із основних її завдань є визначення ефективних шляхів розвитку теорії тріщиноутворення загалом та механізму і послідовності утворення тріщин зокрема.

Виклад основного матеріалу. Детальний аналіз досліджень, проведених вітчизняними та зарубіжними вченими дає змогу говорити про доцільність реалізації наступного шляху розвитку теорії утворення тріщин в бетонних та залізобетонних елементах і конструкціях.

В його основу можна покласти дослідження О.Я. Берга [2], за якими відстань між нормальними тріщинами визначається площею розтягнутого бетону, обмеженого зовнішнім контуром перерізу і величиною радіуса взаємодії, та діаметром арматурних стержнів. За таких обставин, зусилля зчеплення на ділянці між тріщинами, що є залежними від зміни напружень в арматурному стержні вздовж вказаної ділянки, повинні врівноважуватися зусиллями в зазначеній зоні розтягнутого бетону (рис.1), тобто

$$N_{bd,cr} = N_{ct,cr} - \Delta N_{s,i}. \quad (1)$$

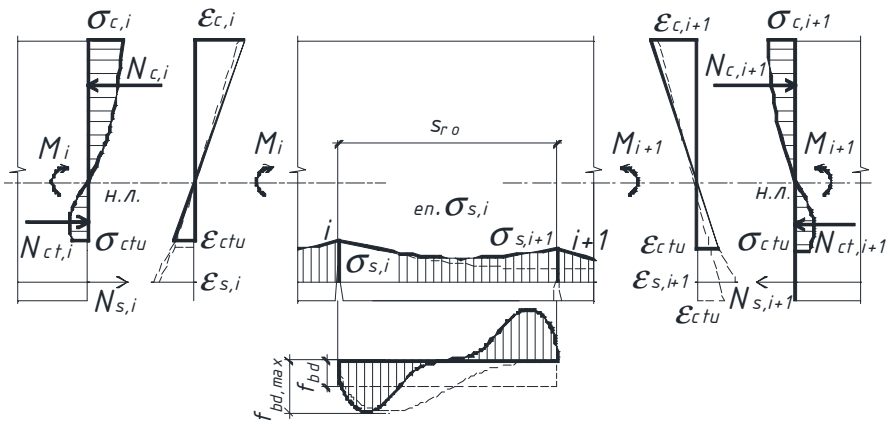


Рис. 1. Схема напружено-деформованого стану згинального залізобетонного елемента в блоці між двома тріщинами

Зусилля активного зчеплення арматурного стержня з бетоном, за відомої функції напружень цього зчеплення $\sigma_{bd}(x)$, можна визначати за формулою

$$N_{bd,cr} = \int_{s_{ro}} u \cdot \sigma_{bd}(x) \cdot dx \cong u \cdot f_{bd} \cdot s_{ro}, \quad (2)$$

де u - периметр перерізу арматурного стержня з площею A_s та діаметром \varnothing , рівний $u = 4 \cdot A_s / \varnothing$;

s_{ro} - ділянка активного зчеплення арматурного стержня з бетоном (базова відстань між тріщинами);

f_{bd} - усереднене розрахункове значення граничних напружень зчеплення арматури з бетоном, що знаходиться за виразом

$$f_{bd} = f_{ct,k} / \eta, \quad (3)$$

$f_{ct,k}$ - характеристичне значення міцності бетону за осьового розтягу;

η - коефіцієнт, що враховує профіль поздовжньої арматури (за [1, 14]: $\eta = 2$ - для гладкої арматури і $\eta = 1$ - для стержнів періодичного профілю).

Максимальне зусилля, що може сприйняти розтягнутий бетон в радіусі ефектвної взаємодії чи активного зчеплення при утворенні тріщини, можна визначити за формулою

$$N_{ct,cr} = \int_{x_{eff}} \sigma_{ct}(x) \cdot b_n \cdot dx \cong f_{ct,k} \cdot A_{ct,eff}, \quad (4)$$

де $A_{ct,eff}$ - площа перерізу розтягнутого бетону в радіусі ефектвної взаємодії або активного зчеплення (рис.2, $A_{ct,eff} = b_n \cdot h_{eff}$).

Зміна зусиль (напружень) в арматурі на ділянці між двома тріщинами обчислюється за виразом

$$\Delta N_{s,i} = (\sigma_{s,i} - \sigma_{s,i+1}) \cdot A_s = \Delta \sigma_{s,i} \cdot A_s, \quad (5)$$

$\sigma_{s,i}$ - напруження в арматурному стержні у перерізі з раніше утвореною тріщиною;

$\sigma_{s,i+1}$ - напруження в арматурному стержні у перерізі з наступною ймовірною тріщиною безпосередньо при її появі.

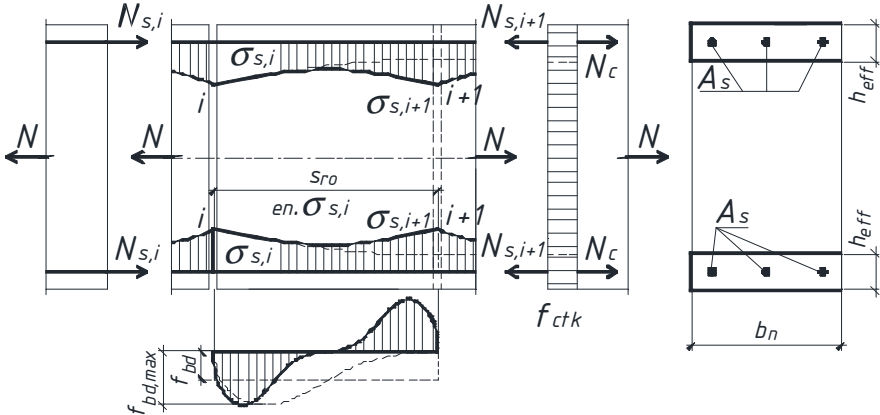


Рис. 2. Схема напружено-деформованого стану центрально розтягнутого залізобетонного елемента в блоці між двома тріщинами

З урахуванням вищенаведених залежностей (2)...(5) базова відстань між тріщинами на рівні осі розтягнутої арматури буде рівною

$$s_{ro} = \eta \cdot \varnothing / 4 \cdot (1 / \rho_{l,eff} - \Delta \sigma_{s,i} / f_{ct,k}), \quad (6)$$

де $\rho_{l,eff}$ - коефіцієнт армування розтягнутого бетону в радіусі ефективної взаємодії або активного зчеплення (рис.2, $\rho_{l,eff} = A_s / A_{ct,eff}$).

Більшість сучасних моделей деформування залізобетонних елементів і конструкцій ґрунтуються на припущенні, що в момент утворення тріщин відбувається часткове проковзування арматури на ділянці її активного зчеплення з бетоном. А раз так, то відстань між тріщинами на поверхні бетону буде залежати ще й від товщини захисного шару бетону, що загалом підтверджено в роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Беручи до уваги результати їхніх досліджень [9], приріст відстані між тріщинами на поверхні бетону можна прийняти рівним $\Delta s_r \cong \varnothing + 2 \cdot c = m \cdot \varnothing \geq 3 \cdot \varnothing$.

Тоді, з урахуванням сказаного, усереднену відстань між суміжними нормальними тріщинами на поверхні конструкції загалом можна визначати за формулою

$$s_{rm} = \Delta s_r + s_{ro} = m \cdot \emptyset + \frac{\eta \cdot \emptyset}{4} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{l,eff}} - \frac{\Delta \sigma_{s,i}}{f_{ct,k}} \right), \quad (7)$$

а за осьового розтягу, коли $\Delta \sigma_{s,i} = 0$, за спрощеним виразом

$$s_{rm} = \Delta s_r + s_{ro} = m \cdot \emptyset + \eta \cdot \emptyset / (4 \cdot \rho_{l,eff}). \quad (8)$$

Залежність (8) в дещо зміненому вигляді, але без порушення її фізичного змісту, нині закладена в основу багатьох національних норм з проектування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій [13, 14, 15]. В зазначених нормативних документах вона поширена і на згинальні елементи завдяки введенню емпіричних коефіцієнтів. Однак подібний шлях універсалізації виразу (8) не може бути визнаний вдалим, оскільки він блокує саму ідею пошуку загальних рішень в теорії тріщиноутворення.

Якщо ж говорити про функцію (7), то вона принципово відрізняється від (8). Її однаковою мірою можна застосовувати як до центрально розтягнутих, так і до згинальних або відцентрово завантажених залізобетонних елементів, а отже вона може претендувати на певну універсальність. Загалом же відомо, що процеси тріщиноутворення залізобетонних елементів і конструкцій пов'язані з визначальними параметрами їх напружено-деформованого стану (зокрема, значеннями кривини $1/\rho_i$, величинами згинаючих моментів M_i , напруженнями в арматурі $\sigma_{s,i}$ та її деформаціями $\varepsilon_{s,i}$ тощо). Тому слід відзначити, що залежність (7) дозволяє описувати послідовність утворення тріщин протягом всього процесу деформування залізобетонного елемента, оскільки прямо і опосередковано враховує зміну вищеназваних параметрів через систему рівнянь (9)

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{rm} = m \cdot \emptyset + \frac{\eta \cdot \emptyset}{4} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{l,eff}} - \frac{\Delta \sigma_{s,i}}{f_{ct,k}} \right); \\ s_{rm} = f(\Delta \sigma_{s,i}) \text{ або } s_{rm} = f(\Delta \varepsilon_{s,i}); \\ \Delta \sigma_{s,i} = f(M_i) \text{ або } \Delta \sigma_{s,i} = f\left(\frac{1}{\rho_i}\right). \end{array} \right. \quad (9)$$

Виходячи з результатів проведених досліджень, варто зробити ряд важливих **висновків**. Зокрема можна констатувати, що розроблена та представлена в статті модель утворення нормальних тріщин:

- методологічно виступає складовою частиною узагальненої моделі деформування бетонних та залізобетонних елементів і конструкцій;
- є універсальною, оскільки в однаковій мірі прийнятна як для центрально розтягнутих, так і для згинальних або відцентрово завантажених залізобетонних елементів;
- у своїй основі максимально позбавлена впливу емпіричних параметрів та коефіцієнтів;

- визначає відстань між суміжними нормальними тріщинами як величину, що змінюється дискретно протягом всього процесу деформування залізобетонного елемента аж до його руйнування;
- відображає залежність усереднених розрахункових значень граничних напружень зчеплення арматури з розтягнутим бетоном від величини напружень в самій арматурі.

1. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашев. - М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с. 2. Берг О.Я. Исследования процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля / О.Я. Берг // Сообщение ВНИИ железнодорожного строительства и проектирования. – М.: Трансжелдориздат, 1954. - № 44. –С. 11-15. 3. Немировский Я.М. Влияние растянутой и сжатой зон бетона на деформации обычных изгибаемых железобетонных элементов после возникновения в них трещин / Я.М. Немировский, О.И. Кочетков // Особенности деформаций бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций. – М.: Госстройиздат, 1969. – С.106-156. 4. Портер Э.Г. Исследование ширины раскрытия трещин в растянутых элементах железобетонных стержневых систем / Э.Г. Портер, В.А. Клевцов, Г.И. Бердычевский // Предварительно напряженные железобетонные конструкции производственных зданий и инженерных сооружений. – М.: Госстройиздат, 1969. – С.26-42. 5. Молодченко Г.А. Исследование процесса трещинообразования в железобетоне при растяжении / Г.А. Молодченко // Строительные конструкции, вып. XIX. – Киев: Будівельник, 1972. –С. 80-84. 6. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с. 7. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с. 8. Городецкий Л.М. Исследование образования и развития трещин в элементах и конструкциях из плотного силикатного бетона: дис. ... канд. техн. наук / Л.М. Городецкий. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 210 с. 9. Гаттас А. Ф. Трещиностойкость стержневых железобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук / А. Ф. Гаттас. – Киев, 1994. – 244 с. 10. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. - Санкт-Петербург - Москва: АСВ, 2004. – 472 с. 11. Цыба О.О. Трещиностойкость и деформативность растянутого бетона с ненапрягаемой и напрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.О. Цыба. – М.: ОАО НИЦ «Строительство» , 2011. - 24 с. 12. Кочкаръов Д.В. Передумови розрахунку та розрахунок прогинів залізобетонних елементів, що зазнають згину, з урахуванням нелінійного деформування матеріалів / Д.В. Кочкаръов, В.І. Бабич // Будівельні конструкції, вип. 74. – Київ: Будівельник, 2011. – С. 406-413. 13. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мікререгіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. - [Чинний від 01.06.11]. – К.: Мікререгіонбуд України, 2011. - 123 с. - (Національний стандарт України). 14. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного натяжения арматуры. – М.: ГУП НИИЖБ, ФГУП ЦПП, 2004. -53 с. - (Стандарт Російської Федерації). 15. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. – Part 1-1: General Rules and Rules for Building; EN 1992-1-1. - [Final Draft, December, 2004]. – Brussels: CEN. - 2004. - 225 p. - (Європейський стандарт).