

определения несущей способности и эксплуатационной надежности построек и сооружений.

**Ключевые слова:** строительство, капитальность, капитальные постройки, классы ответственности.

*Стаття надійшла 01.09.2017.*

УДК 620.191.31; 620.191.33

### **ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*В. Дорофєєв, д. т. н., професор, А. Зінченко, А. Целікова, аспіранти  
Одеська державна академія будівництва та архітектури*

**Постановка проблеми.** Залізобетон, завдяки економічності й універсальності застосування, є одним з основних будівельних матеріалів. Він надає широкі можливості для вирішення будівельних задач. У разі появи в залізобетонних спорудах дефектів і пошкоджень їх потрібно ретельно дослідити і виявляти причини виникнення. Отже, залізобетонним конструкціям властива пошкодженість. Зокрема пошкодженість, що виникла в період технологічної переробки вихідних складових у матеріалі і в його конструкції – початкова технологічна пошкодженість, що характеризується дефектами.

Як відомо, умови розвитку тріщин у матеріалах, які характеризуються константами, прийнятими в механіці (лінійної й нелінійної), вивчає механіка руйнування [1].

Поява тріщин у залізобетоні призводить до порушення його однорідності. Для дослідження напружено-деформованого стану в тріщинах залізобетонних конструкцій, поряд із залученням вихідних положень механіки руйнування, необхідно мати у своєму розпорядженні дані чіткої класифікації тріщин, а також результати експериментів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класифікацію тріщин у залізобетонних конструкціях розглянуто в багатьох працях, наприклад: [2–5]. Зокрема у праці [6] вивчено деформування залізобетону з тріщинами й запропоновано таку класифікацію тріщин:

1) Структурні тріщини, які зазвичай не виділяються для окремого розгляду, а враховуються в інтегральних характеристиках зв'язків між напруженнями і деформаціями. Можливості їх обліку можуть бути різними. У зв'язку з цим структурні дефекти іноді поділяють на два типи: технологічні, що виникають у процесі виготовлення конструкції, і силові – виникають здебільшого у процесі експлуатації конструкції під навантаженням. Істинну межу між силовими і технологічними тріщинами провести важко. У праці [6] відзначено, що силові тріщини зазвичай розташовуються направлено, приводячи в результаті до

вираженої зміни фізико-механічних характеристик за різними напрямками (анізотропії властивостей).

У нашому дослідженні термін «технологічні» вказує на тріщини (спадкові, початкові, залишкові), що виникли в період технологічної переробки матеріалу у виріб і які присутні в ньому до додатка експлуатаційних навантажень.

2) Тріщини руйнування структурних елементів, які перетинають один або кілька структурних елементів, але ще не становлять небезпеки для несучої здатності конструкції загалом.

3) Магістральні тріщини, які характеризують руйнування всієї конструкції загалом або окремих важливих її частин.

Класифікація тріщин складена у нашому випадку для розробки і систематизації способів обліку тріщин у розрахункових моделях залізобетонних конструкцій. Вид тріщин за цією класифікацією може залежати і від виду напруженого стану конструкції. Наприклад, неструктурні тріщини, за яких починається руйнування елемента під час розтягування, можуть бути структурними, якщо той самий елемент піддається стиску [6].

Згідно з інструкцією з проектування бетонних і залізобетонних конструкцій [7], запропонована класифікація тріщин, відповідно до якої в залізобетонних згинальних елементах залежно від зовнішніх силових впливів утворюються тріщини трьох типів:

- нормальні до поздовжньої осі елемента, що перетинають поздовжню і поперечну арматури; утворюються на ділянках, де  $M > M_{\text{сгс}}$ , а  $Q < Q_{\text{сгс}}$ ;

- похилі до поздовжньої осі елемента, що перетинають поздовжню і поперечну арматури; утворюються на ділянках, де  $M < M_{\text{сгс}}$  і  $Q > Q_{\text{сгс}}$ ;

$M_{\text{сгс}}$  і  $Q_{\text{сгс}}$  – згинальний момент і поперечна сила, що відповідають вичерпанню опору поперечних перерізів, утворенню тріщин, відповідно нормальних (з боку розтягнутої грані) і похилих (на рівні нейтральної осі);

$M$  і  $Q$  – максимальні значення згинального моменту і поперечної сили на цій ділянці.

Як відомо, поява тріщин у залізобетонних конструкціях пов'язана з малою розтяжністю бетону. Багаторічна експлуатація, будівництво залізобетонних споруд виявили те, що ці тріщини не порушують загальної монолітності залізобетону [8].

Науковець А. Б. Голишев [8] встановив більш ранню появу тріщин у конструкціях, навантажених повторним навантаженням різних знаків.

Варто пам'ятати, що процес виникнення тріщин поділяють на три стадії: виникнення тріщин, коли вони невидимі, поява тріщин, коли вони видимі неозброєним оком (ширина 0,02-0,03 мм), і розкриття тріщин до гранично можливого розміру.

Вплив тріщин на роботу згинальних елементів визначають коефіцієнти піддатливості перемички з і без урахування поперечних тріщин в її опорних зонах. Вони впливають на перерозподіл зусиль між стовпами несучої системи за розрахунку будинку як складеного стрижня. Вплив поздовжніх тріщин між ребром і полицею на напружено-деформований стан <П>-образний. Якщо до утворення тріщин у зоні чистого згину полиця працювала тільки в одному – поперечному –

напрямку, то після їх утворення – і в поздовжньому, причому на початку і в кінці тріщини спостерігається концентрація напруг, що призводить до зростання тріщини. У такому разі полиця може втратити стійкість від дії поздовжніх зусиль.

Потрібно відзначити, що виникнення і розвиток тріщин можуть бути зумовлені особливостями конструкції й технології зведення будівлі. Якщо зазначені особливості сприяють появі різної деформативності ділянок і шарів бетону, що твердне, дотичних елементів конструкцій, то можливі порушення цілісності менш міцного шару і поява тріщин. Цьому процесу сприяє низька міцність бетону, що твердне.

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначити класифікацію тріщин; вивчити вплив геометричних особливостей конструкції на поле залишкових деформацій; проаналізувати співвідношення, що характеризує стан критичної рівноваги тріщини нормального відриву у пружному тілі.

**Виклад основного матеріалу.** Зростання обсягів будівництва, зокрема монолітних будівель), за останнє десятиліття, і широке застосування бетонних і залізобетонних конструкцій у будівництві вимагають подальшого уточнення їх розрахунку з метою найповнішого врахування чинників, що впливають на їх роботу під навантаженням.

З метою систематизації наявних даних з обліку тріщин можна виділити два класи монолітних будівель:

- виникнення тріщин зумовлено передусім конструктивними ознаками;
- виникнення тріщин не зумовлено конструктивними ознаками.

Відомо, що характер тріщиноутворення і розвитку тріщин у залізобетонних згинальних елементах впливає на їх деформації, прогини і несучу здатність, тому у вивченні питання появи нормальних і похилих тріщин особливу увагу варто приділяти таким чинникам: ступінь насиченості конструкції поперечною й поздовжньою арматурою, міцність бетону, технологічна пошкодженість.

Експлуатаційні навантаження, що діють на конструкцію, зумовлюють у ній деформації й напруги, які матеріал сприймає і перерозподіляє між власними структурними елементами. Несуча здатність конструкції визначається здатністю матеріалу продовжувати виконувати свої функції в нових умовах [9].

Матеріал конструкції (в нашому випадку – важкий бетон) – підсистема, що складається з характерних структурних неоднорідностей. За своїми складом і властивостями бетон належить до композиційних матеріалів (КМ).

У праці [9] запропоновано оцінювати пошкодженість матеріалу за кількістю тріщин в одиниці об'єму матеріалу; відносно обсягу тріщин до обсягу матеріалу, в якому вони утворилися; відносно протяжності тріщин до площі поверхні зразка, на якій вони проявилися. При цьому, як показав аналіз, пошкодженість не поділяється на власне тріщини і внутрішні поверхні розділу. Наявність тріщин передбачає, що в системі є локальні ділянки концентрації напружень і деформацій. Це призводить до виникнення в матеріалі градієнтів деформацій і напружень. Самі тріщини можна уявити як нестабільний елемент структури. Стабільність кожної тріщини тимчасова. Зовнішні впливи, які викликають деформування матеріалу, можуть вивести тріщину з рівноваги, що призведе до її підростання. У свою чергу

підростання окремих тріщин призведе до чергового етапу перерозподілу локальних концентрацій деформацій і напружень.

Отже, власне факт наявності тріщин робить систему нестабільною. При цьому нестабільним елементом є тріщина, провокуючи виникнення градієнтів деформацій і напружень у навколишньому матеріалі.

Для переходу в рівноважніший стан технологічна тріщина має втратити свої основні відмінні ознаки – гирло і фронт тріщини.

У момент початку зростання технологічних тріщин вони починають змінювати свої геометричні параметри (збільшуються довжина і площа поверхні берегів). Отже, технологічні тріщини, як базовий активний елемент структури, перетворюються в експлуатаційні тріщини.

Виникнення і розвиток технологічних тріщин відбуваються одночасно з процесами перетворення матеріалу з вихідної сировини в кінцевий продукт. Можна стверджувати, що виникнення технологічних тріщин – необхідний акт становлення композиційних матеріалів. Сам процес виникнення і розвитку тріщин у матеріалі, який твердне, дещо відрізняється від класичних процесів, прийнятих у теорії міцності [10].

Рухом тріщин на рівні структурних неоднорідностей є своєрідні перегони від одного міжчастичного зв'язку до іншого [9], при цьому, рухаючись, тріщина огинає невідгодні для себе структурні блоки, прагне розвиватися енергетично вигідними траєкторіями, тому мікротраєкторії тріщин, які утворилися в період структуроутворення матеріалу, звивисті з індивідуалів морфологією кожного берега. У зв'язку з утворенням структурних блоків різних масштабних рівнів, зародження і зростання тріщин у матеріалі відбувається не одночасно по всьому об'єму. Зростання кожної тріщини змінює мікродеформований стан окремих обсягів системи, що може сприяти прискоренню або сповільненню зростання сусідніх тріщин.

Як встановили В.С. Дорофєєв і В.Н. Віров [9], механізми розвитку технологічних тріщин на макрорівні визначаються значенням і градієнтом усадочних деформацій на берегах тріщини. У реальних матеріалах збіг осей тріщини і середовища, в якому вона розвивається, – це окремий випадок. Частіше на берегах тріщини виникають різні за усадковістю деформації. У такому разі зона критичної пластичної деформації зсувається в бік того берега тріщини, який зазнає істотних деформацій усадки. Це зумовлює зміна напрямку руху тріщини, і її поворот здійснюється доти, доки усадочні деформації на протилежних берегах не вирівнюються.

На макрорівні відбувається безперервне зростання тріщини, яке залежить від значення і кінетики об'ємних деформацій мікроструктури матеріалу [9].

У праці [11] відзначено, що на зростання тріщин впливають також мікропори і мікротріщини, розташовані на продовженні макротріщини, вони «ініціюють її розвиток, причому макротріщини», відчувають наявність дефекту, тільки на відстані, що не перевищує 2-3 довжини макродефектів».

Макродеформації викликають незворотне деформування, індивідуальну зміну фактури і морфології кожного берега, що не допускає змикання технологічних тріщин за можливих деформацій зворотного знаку [9].

Аналіз характеру тріщиноутворення залізобетонної балки, як найпопулярнішого згинального елемента, показав, що вертикальні і похилі тріщини, що виникли під дією зовнішнього навантаження, проходять по кордонах розділу структурних блоків (повторюють конфігурацію технологічних тріщин). Руйнівна (магістральна) тріщина проходить цими межами і ділить конструкцію на самостійні частини. Аналіз поверхні руйнування показав, що переважний розвиток має магістральна тріщина. Поширена і мікротраєкторія магістральної тріщини – за збереження загального напрямку вона зростає за технологічними поверхневими дефектами. Отож, керуючи технологічними пошкодженнями, можна змінювати умови, кінетику росту і мікротраєкторію магістральних тріщин.

Отже, знаючи швидкість звільнення пружної енергії технологічної тріщини, можна припустити швидкість і етапи розвитку силової тріщини.

У своїй класичній праці А. А. Гриффітс [12] зробив припущення, згідно з яким тріщина отримує можливість поширюватися, якщо швидкість звільнення пружної енергії (в розрахунку на одиницю довжини знову утворилася вільна поверхня) досягає свого критичного значення  $G_c$ , і тому критерій руйнування може бути сформульований як (1):

$$G = G_c \quad (1)$$

Якщо розглянути ізотропне лінійно пружне тіло, для якого об'ємна щільність енергії деформації є  $W = \lambda(\varepsilon_{kk})^2 / 2 + \mu\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$ , і як контур, що охоплює вершину тріщини, вибрати коло радіуса  $r$  ( $r \rightarrow 0$ ), а потім використовувати асимптотику поля напружень біля вершини тріщини нормального відриву [13] (2):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \hat{\sigma}_{ij}(\theta), \quad (2)$$

то для швидкості звільнення пружної енергії  $G = D/i$  можна отримати (3):

$$G = r \lim_{c \rightarrow 0} \int_c \left( W n_1 - (n \cdot \sigma) \cdot \frac{\partial u}{\partial x_1} \right) ds = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2 \quad (3)$$

Зокрема для тріщини нормального відриву критерій руйнування Гриффітса представлений формулою (4):

$$\frac{1}{E} K_1^2 = G_c \quad (4)$$

Якщо в (4) ввести добре відомий результат  $K_1 = \sigma_{22}^\infty \sqrt{\pi l}$  ( $K_1$  – коефіцієнт інтенсивності напружень) для нескінченної пластини з тріщиною довжини  $2l$ , то приходимо до формули Гриффітса (5):

$$\sigma_{22}^\infty = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi l}} \quad (5)$$

Співвідношення (5) характеризує стан критичної рівноваги тріщини нормального відриву в пружному тілі. Якщо за таких навантаження і довжини тріщини звільняється енергія, менша за  $G_c$ , то тріщина не зростає, і тому енергетичний критерій Гриффітса можна сформулювати так: руйнування починається і підтримується, якщо звільнена енергія досягає критичного значення  $G_c$ .

#### Висновки

1. У результаті якісно різних явищ і процесів на різних рівнях структурних неоднорідностей у матеріалі конструкцій виникають і розвиваються однакові елементи структури – тріщини і внутрішні поверхні розділу, які як активні елементи структури, одночасно пошкоджують матеріал.

2. Встановлено, що геометричні особливості конструкції (форма і габаритні розміри) викликають характерне тільки для цієї конструкції поле залишкових деформацій.

3. Проаналізовано співвідношення, що характеризує стан критичної рівноваги тріщини нормального відриву в пружному тілі. Дослідження критерію руйнування Гриффітса дали підстави для висновків: руйнування починається і підтримується, якщо звільнена енергія досягає критичного значення  $G_c$ .

#### Бібліографічний список

1. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции : структура, самоорганизация, свойства / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов ; под ред. В. Н. Вырового. – Одесса, 2010. – 56 с.
2. Бондаренко В. М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения / В. М. Бондаренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 4. – С. 28–33.
3. Бурлин Ю. Ф. Образование, открытие и закрытие трещин в нормальных сечениях железобетонных конструкций / Ю. Ф. Бурлин, К. В. Петрова // Бетон и железобетон. – 1971. – № 5. – С. 28–33.
4. Гусев Б. В. Построение математической теории процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев, А. С. Файвусович // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 41.
5. Мигунов В. Н. Комплексный метод определения деформационных свойств железобетонных конструкций в агрессивных средах / В. Н. Мигунов // ИЛ о НТД. – 1987. – № 87-14. – Пенза, 1987. – 4 с.
6. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.
7. Залесов А. С. Практический метод расчета железобетонных конструкций по деформациям / А. С. Залесов, В. В. Фигаровский. – М. : Стройиздат, 1976. – 101 с.

8. Гольшев А. Б. Соппротивление железобетона / А. Б. Гольшев, В. И. Колчунов. – К. : Логос, 2009.
9. Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. – О. : Город мастеров, 1998. – 168 с.
10. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1976. – 208 с.
11. Ромалис Н. Б. Разрушение структурно-неоднородных тел / Н. Б. Ромалис, В. П. Тамуж. – Рига : Зинатне, 1989. – 224 с.
12. Griffith A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1920. – V. A221. – P. 162–198.
13. Астафьев В. А. Нелинейная механика разрушения / Астафьев В. А., Радаев Ю. Н., Степанова Л. В. – Самара : Из-во «Самарский университет», 2004. – 59 с.
14. Irwin G. R. Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate / Irwin G. R. // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1957. – V. 24. – P. 361–364.
15. Irwin G. R. Fracture / Irwin G. R. // In: Springer Encyclopedia of Physics. – 1958. – V. 6. – P. 551–590.

**Дорофеев В., Зінченко Г., Целікова А. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів**

Подано результати дослідження напружено-деформованого стану в тріщинах згинальних залізобетонних елементів з урахуванням технологічної пошкодженості. Подано класифікацію тріщин для розробки і систематизації способів обліку тріщин у розрахункових моделях залізобетонних конструкцій. Вид тріщин за цією класифікацією може залежати і від виду напруженого стану конструкції, а також запропонована класифікація тріщин, відповідно до якої утворення тріщин у залізобетонних згинальних елементах залежить від зовнішніх силових впливів. Проаналізовані зародження та розвиток технологічних тріщин відбуваються одночасно з процесами перетворення матеріалу з вихідної сировини в кінцевий продукт. Доведено, що виникнення технологічних тріщин є необхідним актом становлення композиційних матеріалів. А сам процес виникнення і розвитку тріщин у тверднучому матеріалі дещо відрізняється від класичних процесів, прийнятих у теорії міцності.

**Ключові слова:** залізобетон, деформації, конструкції, тріщини, класифікація, експлуатація.

**Dorofeev V., Zinchenko A., Tselikova A. Influence of material technological damage on the stressed-deformed state of bending reinforced concrete elements**

The article is devoted to the results of investigation of stress-strain state in cracks of bent ferro-concrete elements taking into account technological damage. This article presents a classification of cracks for the development and systematization of methods for accounting for cracks in design models of reinforced concrete structures. The type of cracks in this classification may depend on the type of stress state of the structure, and also the classification of cracks is proposed, according to which in reinforced concrete bending elements depending on external force effects. The origin and development of

technological cracks occurring simultaneously with the processes of transformation of the material from the raw material into the final product are analyzed. The author claims that the occurrence of technological cracks is a necessary act of the formation of composite materials. And the process of occurrence and development of cracks in the hardening material differs somewhat from the classical processes adopted in the theory of strength.

**Key words:** reinforced concrete; deformation; constructions; cracks; classification; exploitation.

**Дорофеев В., Зинченко А., Целикова А. Влияние технологической поврежденности материала на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов**

Поданы результаты исследования напряженно-деформированного состояния в трещинах изгибаемых железобетонных элементов с учетом технологической поврежденности. Представлена классификация трещин для разработки и систематизации способов учета трещин в расчетных моделях железобетонных конструкций. Вид трещин по данной классификации может зависеть и от вида напряженного состояния конструкции, а также предложена классификация трещин, в соответствии с которой образование трещин в железобетонных изгибаемых элементах зависит от внешних силовых воздействий. Проанализированы зарождение и развитие технологических трещин, происходящих одновременно с процессами превращения материала из исходного сырья в конечный продукт. Автор утверждает, что возникновение технологических трещин является необходимым актом становления композиционных материалов. А сам процесс возникновения и развития трещин в твердеющем материале несколько отличается от классических процессов, принятых в теории прочности.

**Ключевые слова:** железобетон, деформации, конструкции, трещины, классификация, эксплуатация.

*Стаття надійшла 04.05.2017.*

УДК 624.012. 035

**АНАЛІЗ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ЗА НЕСУЧОЮ ЗДАТНІСТЮ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ  
ЗА РІЗНИМИ МЕТОДИКАМИ**

*А. Мазурак, к. т. н., І. Ковалик, асистент, В. Михайлечко, старший викладач,  
О. Андрушків, аспірант  
Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Проблема оцінки залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів і сьогодні залишається актуальною, незважаючи на велику кількість як наявних методик, так і нормативних пропозицій щодо розрахунку. Це призводить до використання різних методів розрахунку, що в одних