

На правах рукопису

Г Е М Б А Р А
Тарас Васильович

ВИЗНАЧЕННЯ З ПОЗИЦІЙ
ТЕОРІЇ ТРІЩИН РЕСУРСУ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Спеціальність 01.02.04 — механіка деформівного
твердого тіла

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



00814823 (Q)

Робота виконана у Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка АН України.

Науковий керівник: член-кореспондент АН України,
доктор технічних наук, професор
АНДРЕЙКІВ Олександр Євгенович

Науковий консультант: кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
ЛУЧКО Йосип Йосипович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор
РУСИНЮ Костянтин Миколайович
кандидат технічних наук, доцент
БАРАБАШ Василь Михайлович

Провідна установа: Науково-дослідний інститут будівельного виробництва, м. Київ.

Захист відбудеться "___" _____ 1993 р. о ___ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.42.01 при
Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка АН України
(290601, м. Львів, МСП, вул. Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка АН України.

Автореферат розісланий "___" _____ 1993 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

НИКИТОРЧИН

ГРИТОРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальність теми. Проблема визначення ресурсу залізобетонних елементів конструкцій виникає при проектуванні та експлуатації споруд. Згідно положень будівельних нормативних документів зародження та розвиток тріщин у розтягнутій зоні залізобетонних балочних елементів при згині вважається причиною втрати експлуатаційних властивостей. Поява тріщин в бетоні викликає доступ зовнішнього середовища до сталевий арматури, через що відбувається корозія металу. В свою чергу, надмірне розкриття берегів тріщин свідчить про досягнення критичних напружень в арматурі та небезпеку катастрофічного руйнування елемента конструкції. Тому вивчення закономірностей зародження і розвитку тріщин в залізобетонних елементах та їх врахування при розрахунках має важливе значення для підвищення надійності та довговічності будівельних конструкцій.

В даній області науки про міцність накопичений значний фактичний матеріал, запропоновано ряд фізичних та феноменологічних концепцій про вплив тріщин на міцність залізобетону. Однак більшість розроблених методів розрахунку залізобетону з тріщинами базується лише на емпіричних даних, без врахування реального напружено-деформованого стану в області тріщин. Тому підходи різних дослідників по розрахунку міцності та розкриття тріщини часто не мають єдиного концептуального зв'язку. Про це свідчить, наприклад, той факт, що якщо розрахувати залізобетонний елемент по нормативних документах різних країн, які є, в основному, досягненнями теорій залізобетону різних напрямків, то виявиться, що на елемент, який призначений для єдиних умов експлуатації при проектуванні витрачається різна кількість арматури, або при розрахунку елемента в стадії експлуатації отримуються різні значення його ресурсу. Очевидно, що відсутність єдиного методологічного підходу часто веде до перевитрат арматурної сталі при проектуванні або може бути причиною непередбачених руйнувань споруд.

Одним із перспективних напрямків рішення вказаних задач є застосування методів теорії тріщин до залізобетону, які ґрунтуються на математичному моделюванні реальних фізичних

явищ при зародженні та розвитку тріщин. Теоретико-експериментальне обґрунтування переваг такого підходу представлено в роботах Панасюка В.В., Андрейківа О.Б., Яреми С.Я., Зайцева Ю.В., Пересипкіна Є.М., Трапезникова Л.П., Русинка К.М., Лучка Й.Й., Чубрикова В.М. та ін. При розрахунку параметрів механіки руйнування в даному випадку виникає ряд труднощів, наприклад необхідність врахування умов зчеплення арматури з бетоном, проблематичним є також визначення характеристик тріщиностійкості бетону. Аналіз літератури показує на недостатність досліджень, присвячених вивченню поведінки залізобетонних балочних елементів з тріщинами та без них, при дії довготривалих статичних навантажень згином, з позицій теорії тріщин. Слід відзначити, що такі дослідження є актуальними, так як пов'язані із вирішенням проблеми достовірного та надійного прогнозування довготривалої експлуатаційної придатності будівельних конструкцій.

Метою дисертації є розробка з позицій теорії тріщин методики для визначення ресурсу залізобетонних елементів конструкцій типу плит та балок із стержневою арматурою, з нормальними тріщинами у розтягнутій зоні та без них, згідно вимог категорій тріщиностійкості діючих будівельних нормативних документів, при статичних навантаженнях згином, враховуючи умови зчеплення арматури з бетоном та фізико-механічні характеристики тріщиностійкості бетону.

У відповідності з метою в роботі ставляться наступні завдання:

1. Вибрати критерій розвитку тріщин в розтягнутій зоні залізобетонних балочних елементів при статичному навантаженні згином.

2. Розробити методику розрахунку параметрів тріщиностійкості для балочного елементу з тріщиною при короткочасному згині, враховуючи умови зчеплення стержневої арматури з бетоном.

3. Розробити методику визначення статичного навантаження тріщиноутворення для залізобетонних балочних елементів.

4. Визначити параметри тріщиноутворення внаслідок повзучості та усадки бетону при довготривалому згині залізобетонних елементів.

5. Розрахувати розкриття берегів тріщин та ріст їх довжини при довготривалому згині балочного елемента.

6. Вибрати методикку випробувань бетонних зразків з надрізами, визначити по ній фізико-механічні характеристики тріщиностійкості звичайних видів бетону марок В10-В40 та бетону із введенням грубого базальтового волокна.

7. Провести апробацію запропонованих методів визначення ресурсу шляхом співставлення результатів розрахунків з позицій теорії тріщин та по будівельних інженерних методиках з даними експериментів.

8. Розробити, з позицій теорії тріщин, методи по розрахунку ресурсу залізобетонних балочних елементів з тріщинами та без них згідно вимог категорій тріщиностійкості будівельних нормативних документів (ВНП 2.03.01-84).

Методи досліджень. У роботі застосовується аналітичні методи теорії тріщин для пружнопластичних тіл у сполученні з методами теорій повзучості і міцності залізобетону.

Фізико-механічні характеристики тріщиностійкості отримувались на основі випробувань балочних зразків з надрізами згідно методик механіки руйнування, причому контроль за розвитком тріщин здійснювався за допомогою спеціально розробленого устаткування.

Наукова новізна.

1. На основі сучасної механіки руйнування запропоновані критерії розвитку нормальних тріщин в залізобетонних балочних елементах конструкцій із стержневою арматурою, в які входять параметри, що враховують зусилля зчеплення арматури з бетоном та відшарування бетону від стержнів.

2. Запропонована модель розвитку тріщин внаслідок повзучості в залізобетонному елементі при довготривалому згині, яка поширена для випадку системи тріщин.

3. Визначено вплив фізико-механічних характеристик тріщиностійкості бетону на тріщиноутворення при довготривалому згині елементів, армованих у розтягнутій та стисненій зонах.

4. Запропонована методика розрахунку залізобетонних елементів конструкцій при згині згідно вимог категорій тріщиностійкості будівельних нормативних документів, з позицій теорії тріщин, яка враховує характеристики тріщиностійкості

бетону.

5. Розроблена нова методика контролю за розкриттям та ростом довжини тріщин у залізобетонних елементах при згині.

6. В результаті випробувань трьоохтєховим згином бетонних зразків з надрізами з метою визначення характеристик їх тріщиностійкості встановлено, що введення грубого базальтового волокна у бетонну суміш підвищує тріщиностійкість бетону.

Апробація роботи. Результати досліджень та основні положення роботи доповідались і обговорювались на II Всесоюзній конференції "Механіка неоднорідних структур" (м. Львів, 1987), I Всесоюзній конференції "Механіка руйнування матеріалів" (м. Львів, 1987), науково-технічній конференції "Міцність та температурна тріщиностійкість споруд" (м. Нарва, 1988), I-му Всесоюзному симпозиумі "Механіка і фізика руйнування композитних матеріалів" (м. Ужгород, 1988), Всесоюзній конференції по композиційним матеріалам на основі базальту (м. Київ, 1988), IV симпозиумі "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при складному напруженому стані" (м. Севастополь, 1992), XIII науковій конференції молодих вчених інституту механіки АН України (м. Київ, 1992), I-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (м. Львів, 1993).

Практична цінність.

1. Запропонована в роботі модель розвитку тріщин в розтягнутій зоні залізобетонних балочних елементів використана для прогнозування кінетики тріщин внаслідок повзучості бетону при довготривалому статичному згині.

2. Методика визначення умов зародження тріщин використана для прогнозування тріщиноутворення в розтягнутій зоні балочних елементів при армуванні як стисненої, так і розтягнутої зон.

3. Результати експериментальних випробувань бетонних зразків з надрізами та їх аналізу з позицій теорії тріщин дозволяють стверджувати, що введення грубого базальтового волокна підвищує тріщиностійкість бетону.

4. Розроблена методика контролю за ростом довжини тріщин у розтягнутій зоні та їх розкриття на поверхні залізобетонних балочних елементів дозволяє проводити дистанційний контроль за розвитком тріщин у натурних конструкціях, зменшує трудо-

емкість лабораторних випробувань.

5. Отримані в роботі математичні співвідношення забезпечують можливість визначення ресурсу залізобетонних балочних елементів, згідно вимог категорій тріщиностійкості будівельних нормативних документів, на основі даних про навантаження на елемент, геометричні та міцнісні характеристики бетону та арматури, параметр тріщиностійкості бетону, умови зчеплення арматури з бетоном та параметри повзучості і осадки бетону.

6. Розроблені в дисертації методики оцінки ресурсу елементів залізобетонних конструкцій впроваджені на ВО "Закарпатзалізобетон".

7. Розроблено інженерні рекомендації по розрахунку залізобетонних балочних елементів з позицій теорії тріщин (препринтне видання).

На захист виносяться наступні наукові результати і положення:

- запропонований метод розрахунку параметрів тріщиностійкості для залізобетонних балочних елементів конструкцій із тріщинами у розтягнутій зоні, та критерій їх розвитку, що дозволяє враховувати зусилля зчеплення арматури з бетоном та розшарування між ними в області тріщин;
- розрахункова модель росту тріщини в залізобетонному балочному елементі внаслідок повзучості бетону при довготривалих статичних навантаженнях;
- методика визначення параметрів тріщиноутворення при статичному згині елементів;
- розроблений пристрій для дистанційного контролю за ростом тріщин у залізобетонних конструкціях;
- розроблена з позицій теорії тріщин методика визначення ресурсу залізобетонних елементів конструкцій типу плит та балок по вимогах нормативних категорій тріщиностійкості для будівельних конструкцій.

Публікації. Основні результати дисертації викладені у 12 роботах.

Структура дисертацій. Дисертація складається з передмови, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаної літератури 122-х найменувань. Загальний об'єм складає 130 сторінок машинописного тексту, 23 малюнки і 4 таблиці.

У передмові викладений короткий зміст дисертації і обгрунтована актуальність, наукова новизна та практична цінність роботи.

У першому розділі розглянуті існуючі підходи для розрахунку на міцність бетону та залізобетону, в тому числі з позицій теорії тріщин. Вказано та проаналізовано недоліки і обмеження в застосуванні існуючих підходів, визначена мета роботи і завдання її основних досліджень.

У другому розділі обгрунтовано вибір критерію розвитку нормальної тріщини в балочному елементі із стержневою арматурою, пропонується методика розрахунку критичного коефіцієнта інтенсивності напружень та наближений метод визначення розкриття у вершині тріщини. При цьому визначаються зусилля в арматурних стержнях в області тріщини із врахуванням умов зчеплення з бетонною матрицею.

У третьому розділі описана модель розвитку тріщини в балочному елементі при довготривалому статичному згині внаслідок повзучості бетону, на основі якої проведений розрахунок розкриття її берегів та росту довжини. Наведено ілюстрації розвитку параметрів тріщини у еквівалентних залізобетонних елементах для бетонів марок В10, В15, В20, В25, В30, В35, В40. Приділено увагу розробці методу розрахунку розкриття берегів тріщини в області її контакту із арматурою, яке є нормативним будівельним параметром.

У четвертому розділі описані методики розрахунку навантажень тріщиноутворення, умов зародження систем тріщин внаслідок повзучості та осадки бетону, розглядається розвиток систем тріщин у балочних елементах при довготривалому згині.

У п'ятому розділі описуються методи розрахунку, з позицій теорії тріщин, ресурсу залізобетонних балочних елементів по вимогах тріщиностійкості будівельних нормативних документів; проілюстрована методика проведення випробувань для визначення характеристик тріщиностійкості бетону. Проводиться апробація основних теоретичних результатів у порівнянні із традиційними інженерними методиками та експериментальними даними.

У загальних висновках показані переваги перед існуючими запропонованих в дисертації інженерних підходів, що дозволя-

ють, на основі сучасних положень механіки руйнування, розраховувати та проектувати залізобетонні елементи конструкцій типу плит та балок згідно стандартних будівельних вимог по тріщиностійкості, враховуючи нові додаткові параметри - зчеплення арматури з бетоном та характеристику тріщиностійкості бетону. Найефективніша реалізація запропонованих підходів для елементів із коефіцієнтом армування до 3% при застосуванні дрібнозернистих бетонів.

СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Аналіз літератури показує, що більшість існуючих методів розрахунку бетону та залізобетону з позицій теорії тріщин побудована на використанні концепції критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} . Це питання критично розглянуто в ряді найновіших робіт А.Хіллерборга, З.Базанта, Дж.Планаса, Є.Н.Пересипкіна та ін., де переконливо доведено, що у бетоні перед вершиною тріщини є область псевдопластичних деформацій значних розмірів. Отже в даному випадку необхідно застосовувати інші критерії теорії тріщин, наприклад деформаційні критерії Леонова-Панасюка, Хіллерборга та Інґраффеа-Саоума, які полягають у концепції критичного розкриття у вершині тріщини і відрізняються лише моделюванням напружень у зоні перед вершиною тріщини.

При розрахунку залізобетонних балочних елементів у відомих роботах стержневу арматуру моделюють як пружний шар, зчеплений з бетонною матрицею, через що питання відшарування бетону від стержнів в області тріщини та впливу профілю арматури на тріщиностійкість залишаються мало вивченими.

В даній дисертації для оцінки напруженого стану при статичному навантаженні залізобетонного балочного елемента з тріщиною використовується коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K_I , який обчислюється з міркувань суперпозиції напружених станів у вигляді:

$$K_I = K_I^{(M)} - K_I^{(\alpha)} \quad ; \quad (I)$$

де $K_I^{(M)}$ обчислюється методом граничної інтерполяції як КІН

для навантаженого неармованого еквівалентного бетонного елемента з тріщиною, а $K_I^{(a)}$ - як КІН для бетонного елемента, в якому на берегах тріщини, в точках центру ваги поперечного перерізу арматурних стержнів, прикладені сили. Для обчислення $K_I^{(a)}$ напруження в області вершини тріщини $\sigma_2^{(a)}$ знайдено як напруження від впливу періодичної системи зосереджених зусиль, прикладених на віддалі h від вершини тріщини. При цьому використано розв'язок для круглої плоскої тріщини, на берегах якої прикладені зосереджені сили, знайдений методом сингулярних інтегральних рівнянь. В результаті цього K_I для залізобетонного балочного елемента з тріщиною записується на основі формули (1) так:

$$K_I = \frac{11,9274 M \sqrt{A}}{H \sqrt{H} (1-\lambda)^{3/2} \sqrt{1+7,9927\lambda}} - \beta \frac{P_0}{h_1} \sqrt{\frac{2c}{\pi}} \left[\frac{6a}{H} + 1 \right] \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(b+h)^c}{6[(b+h)^c - b^c] + a \left[\frac{6a}{H} + 1 \right]^{-2} (b-h)^c (1-\delta_0^c)}} ; \quad (2)$$

де a - довжина тріщини, H - висота елемента, $\lambda = \frac{a}{H}$; M - згинаючий момент; $c = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}} - 4$; $\delta_0 = \frac{a-h}{a}$; $b = H-a$, h_1 - віддалі між стержнями. Тут значення β - відношення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I \text{ inf}}^{(a)}$, у випадку моделювання стримуючого впливу арматури на розвиток тріщини зосередженими зусиллями до $K_{I \text{ inn}}^{(a)}$, у випадку моделювання пружним шаром, тобто рівномірно розподіленими зусиллями P_0/h_1 по лінії контакту стержнів з поверхнею тріщини, для якого введена формула:

$$\beta = \frac{\text{sh } 2\pi\delta}{\text{ch } 2\pi\delta - \cos \frac{2\pi\gamma}{h_1}} ; \quad (3)$$

де $\delta = h/h_1$; γ - координата вздовж ряду стержнів.

Зусилля в арматурних стержнях P_0 обчислюються із врахуванням відшарування бетону і арматури в області берегів тріщини, тобто відсутності їх зчеплення на відрізку h_0 вздовж стержня:

$$P_0 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\delta_a}{h_0} E_s ; \quad (4)$$

де E_s - модуль пружності арматури, h_0 - віддаль між точками прикладання зусиль P_0 , δ_a - розкриття берегів тріщини на рівні центру ваги поперечного перерізу арматури, яке визначається аналогічно як і K_x , з міркувань суперпозиції напружених станів, із використанням відомого розв'язку задачі визначення розкриття берегів тріщини при розтягу площини з тріщиною зосередженими зусиллями, прикладеними на деякій віддалі від берегів тріщини та методу еквівалентних напружених станів, для визначення розкриття берегів тріщини від дії згинаючого моменту. При цьому з умови рівноваги зусиль в арматурі на ділянці відшарування бетону і стержнів в області тріщини та на "вмурованій" ділянці, які визначені Пересипкіним Б.М. наближено обчислюється довжина h_0 відрізу відшарувань на стержні.

Розрахунки по формулі (2) K_x для залізобетонної плити з тріщиною показують (рис.І) переваги застосування запропонованого методу моделювання стержневої арматури зосередженими зусиллями перед традиційним принципом її "розмазування", тобто моделювання рівномірно розподіленими стискаючими напруженнями. В даному випадку показано, що при збільшенні віддалі між стержнями зростає похибка при обчисленні значень K_x традиційним методом, а це приводить до недооцінки напруженого стану.

Для оцінки граничного стану при статичних навантаженнях у роботі вибрано критерій Леонова-Панасюка. Згідно з концепцією критерію вважається, що тріщина в бетоні починає розвиватись, якщо розкриття її берегів у вершині досягає деякого критичного значення δ_x , яке є константою матеріалу. Критерій відрізняє наочність та зручність в реалізації для бетону, так як доведено, що його застосування для матеріалів із значними розмірами пластичних зон перед вершиною тріщини дає задовільні результати. Згідно вибраного критерію руйнування, напруження сил зчеплення берегів тріщини у її вершині

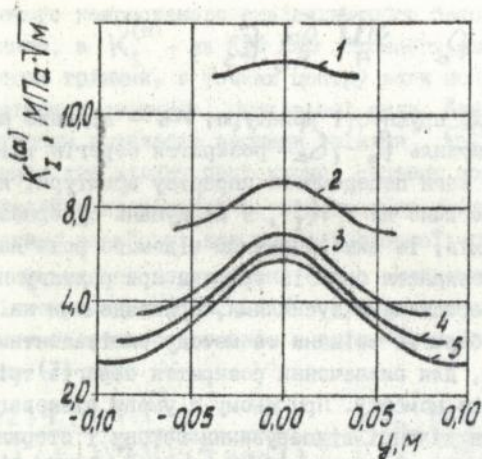


Рис.І. Значення КІН K_I на проміжку між стержнями арматури в залежності від віддалі h_2 між ними: $h_2/2 =$
 1) 0,04 м; 2) 0,06 м; 3) 0,07 м; 4) 0,09 м; 5) 0,1 м.
 для числового прикладу залізобетонної плити з наступними параметрами: $\alpha = 0,1$ м, $H = 0,35$ м, $E_B = 2,7 \cdot 10^{10}$ Па (модуль пружності бетону), $\mu = 0,15$ (коефіцієнт Пуассона для бетону), $T = 1,8$ м (ширина), $R_{ct} = 1,4 \cdot 10^6$ Па (границя міцності важкого бетону нормального твердіння марки В20 при одновісному розтязі), $E_s = 2 \cdot 10^{11}$ Па (для арматури класу АIII), $h = 0,03$ м; $D = 0,018$ м; $l_{sv} = 0,36$ м (довжина відрізка арматури, де діють напруження зчеплення з бетоном із середнім значенням $\tau_{sv} = 5 \cdot 10^6$ Па).

наближено вважаються рівними границі міцності при одновісному розтязі для бетону R_{ct} .

Розрахунки розкриття у вершині тріщини δ_{rv} проводились на основі наближеного методу еквівалентних напружених станів по формулі

$$\delta_{rv} = \frac{K_I^2}{K_I^{(M)2}} \delta_{\epsilon}; \quad (5)$$

де δ_{ϵ} - розкриття у вершині тріщини в еквівалентному неармо-

ваному елементі при згині; $K_2^{(M)}$ - та ж величина, що і в (I).

При побудові розрахункової моделі руйнування залізобетонних елементів при довготривалому згині використовується співвідношення між напруженнями та деформаціями теорії спадкового старіння бетону, виведені Масловим Г.К. та Арутюняном Н.Х. Функція міри повзучості вибрана у формі

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - e^{-\gamma_0(t-\tau)}]; \quad (6)$$

де $\varphi(\tau) = C_0 + A_1/\tau$, t - тривалість навантаження, τ - вік бетону у початковий момент навантаження, C_0 , A_1 , γ_0 - параметри повзучості. Така форма забезпечує добру кореляцію з експериментальними кривими повзучості бетону в старому та молодому віці, а також відображає такі явища повзучості бетону, як старіння і спадковість.

Для дослідження розвитку тріщин в бетоні при довготривалих навантаженнях застосований підхід, розроблений Зайцевим Ю.В. Згідно цього підходу, при довготривалому навантаженні бетон вважається пружним матеріалом з умовним модулем пружності E_{nb} , залежним від часу:

$$E_{nb}(t) = \frac{E_0}{1 + C(t, \tau) E_0} \quad (7)$$

Показано, що в даному випадку дотримуються умови теорії Арутюняна Н.Х. для старіючих пружнопластичних тіл, в яких розвиваються тріщини.

Розвиток тріщини в бетоні при довготривалих статичних навантаженнях розділяється, згідно прийнятого принципу Камінського А.А., на два періоди: інкубаційний та квазістатичного росту тріщини. Прийнято, що під час інкубаційного періоду розкриваються береги тріщини у вершині при постійній її довжині, а ріст тріщини почнеться, коли розкриття у її вершині досягне критичного значення δ_k . При обчисленні розкриття у вершині тріщини використовується метод еквівалентних напружених стержнів. В інкубаційний період розвитку тріщини у формулі (5) значення K_1 приймається залежним від часу, за рахунок зміни його силової частини внаслідок повзучості бетону в області виходу стержнів на поверхню тріщини та збільшення відшарувань стержнів.

На основі умови досягнення критичного розкриття δ_k у вершині тріщини в кінці інкубаційного періоду виведене співвідношення для визначення його тривалості t_k . Очевидно, що у випадку, коли при розрахунках $t_k \rightarrow \infty$, не існує загрози росту тріщини.

При розрахунку тривалості інкубаційного періоду для залізобетонного балочного елемента з тріщиною особливу увагу приділено можливості уникнення росту тріщин, застосовуючи відповідні марки бетону.

У період квазістатичного росту довжини тріщини функціями, залежними від часу, вважаються всі параметри рівняння (5) і, згідно прийнятої моделі руйнування, використовуючи метод еквівалентних напружених станів, можна записати:

$$\delta_g(\alpha(t)) = \frac{K_I^2(\alpha(t))}{K_I^{(n)2}(\alpha(t))} = \delta_k; \quad (8)$$

де $\alpha(t) = \alpha$ - довжина тріщини в період часу t . Вважається, що співвідношення (8) дотримується у будь-який момент часу t періоду росту довжини тріщини.

Оцінити довжину тріщини в будь-який момент часу t можна наближено, знайшовши значення $\alpha(t)$ із співвідношення (8). Вперше встановлено, що ріст довжини тріщини визначається не тільки міцністними характеристиками бетону та арматури, функцією міри повзучості бетону, але й характеристикою тріщиностійкості бетону, порушенням зчеплення арматури з бетоном з плином часу.

Практичний інтерес представляє визначення розкриття тріщини на поверхні елемента, так як часто у залізобетонних балочних елементах, наприклад, в плитах перекриття, через труднощі доступу до бокових поверхонь неможливо виміряти довжину тріщини. Розкриття тріщини на поверхні можна обчислити тим же методом суперпозиції, що і розкриття тріщини на рівні арматури.

Числові приклади показують, що для достатньо зрілого бетону при довготривалому навантаженні елемента з тріщиною, її розкриття на поверхні та ріст довжини мають взаємно пропорційний вгасаючий характер та значно залежать від марки бетону (рис. 2).

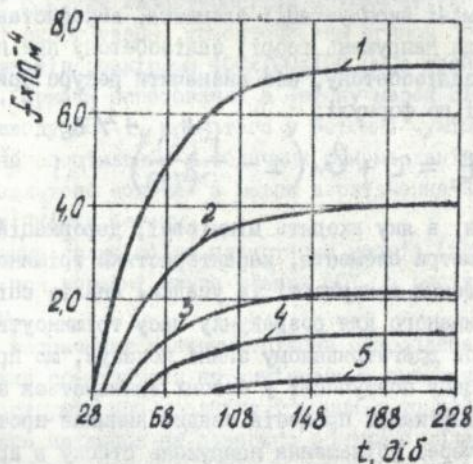
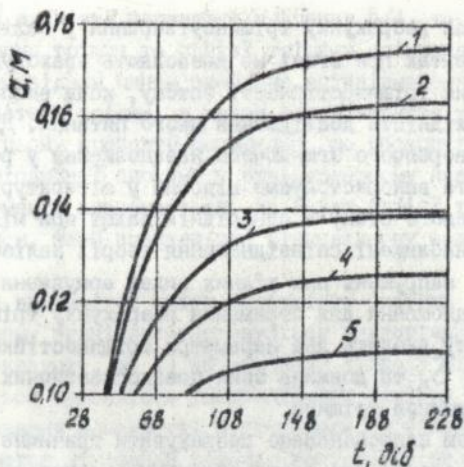


Рис.2. Ріст довжини тріщини a та розкриття на нижній грані елемента f після інкубаційного періоду для різних марок бетону: 1) B10; 2) B15; 3) B20; 4) B25; 5) B30. Для числового прикладу залізобетонної плити при $h_1 = 0,08$ м (див. дані рис.1).

Існуючі методи розрахунку тріщиноутворення у залізобетонних балочних елементах при згині не дозволяють враховувати вплив характеристик тріщиностійкості бетону, хоча експерименти показують необхідність дослідження цього питання. Для визначення тріщиноутворюючого згинаючого навантаження у розтягнутій зоні елемента використовуємо відомий у літературі метод визначення напруженого стану в однорідній балці при мікротріщиноутворенні та наближені співвідношення теорії залізобетону для визначення напружень при різних видах армування. Важливо, що у співвідношення для отримання розрахунку тріщиноутворюючого моменту входять два параметри тріщиностійкості бетону - величина δ_k та довжина зони псевдопластичних деформацій перед верхньою тріщиною.

Тим же методом запропоновано розрахувати граничне навантаження тріщиноутворення при довготривалому статичному згині при заданому терміні експлуатації елемента, використавши співвідношення для напружень теорії залізобетону при повзучості та осадці залізобетону, або визначити ресурс при заданому навантаженні по формулі:

$$t_c = \tau + \ell_m \left(1 - \frac{F^*(t)}{\varphi(\tau)} \right)^{-1/\delta_0} ; \quad (9)$$

де $F^*(t)$ - функція, в яку входять міцнісні, деформаційні та геометричні параметри елемента, характеристики тріщиностійкості, співвідношення повзучості та усадки. Аналіз співвідношення (9), отриманого для розрахунку часу тріщиноутворення t_c у елементі при довготривалому згині показує, що при інтенсифікації процесу повзучості у бетоні зменшується значення t_c . При інтенсифікації процесів осадки виникає протилежний ефект, очевидно, через збільшення напружень стиску в арматурі.

Реалізація опрацьованого методу розрахунку параметрів тріщин у випадку систем тріщин в залізобетонних балочних елементах проведена на основі результатів чисельних розрахунків Трапезникова Л.П. та Пашенка В.І. КІН для балочних елементів із періодичними системами тріщин. На основі апроксимації результатів розрахунків отримане співвідношення для КІН $K_x^{(M)}$ у випадку системи тріщин на основі зв'язку для однієї тріщини. Якщо відношення віддалі S між тріщинами до

висоти H елемента перевищує значення $5/4$, то розв'язок задачі для системи тріщин та однієї тріщини співпадає.

Відповідним чином знайдено співвідношення для K_I у випадку системи тріщин, а також для розкриття у вершині тріщини. При цьому прийнято допущення, що розкриття берегів тріщини періодичної системи у еквівалентному неармованому балочному елементі визначається, як і для однієї тріщини, напруженим станом, який виникає при відповідному значенні КН системи.

При визначенні зміни параметрів системи тріщин при довготривалому згині використовується аналогічний підхід. Розрахунки показують, що із збільшенням віддалі між тріщинами зменшується тривалість інкубаційного періоду і тріщини за період згасання позаучасті підрастають на більшу довжину.

З метою отримання величин критичного розкриття тріщини у вершині δ_k , як характеристики тріщиностійкості матеріалу, проведені випробування трьохточковим згиним призматичних балочних зразків розмірами $400 \times 100 \times 100$ мм з краповою тріщиною-надрізом. Зразки виготовлені з бетону марок В10 - В40 Львівського заводу ЗБК-1, крім того у бетонні суміші марок В15 та В25 згідно спеціальних методичних рекомендацій було введено грубе базальтове волокно з метою дослідження його впливу на тріщиностійкість бетону.

Тріщина являє собою наскрізний надріз (довжиною 30-40 мм), кут при вершині якого рівний 60° , з радіусом заокруглення $0,1$ мм.

Для визначення довжини тріщини розроблена спеціальна методика, яка ґрунтується на вимірюванні зміни параметрів поля вихрових струмів при розвитку тріщини у тонкій металевій фользі, яка наклеєна на поверхню зразка в області надрізу. З її допомогою вдається подолати відомі труднощі практичного вимірювання довжини тріщини в бетоні та зони псевдопластичних деформацій (мікророзтріскування) перед її вершиною. Крім того вона дозволяє проводити дистанційний контроль за ростом тріщини та використовувати при цьому записувачі пристрої. Перед випробуваннями проводилась таріровка вимірювальної апаратури, де довжина тріщини та зона мікророзтріскування визначались при допомозі катетометра та методу капілярної ад-

сорбції спеціальної рідини в області тріщини.

Для визначення розкриття у вершині тріщини застосовується формула, виведена на основі підбору емпіричної кривої числових результатів, отриманих методом скінчених елементів Йенгом та Шахом. З табл. I видно, що характеристика тріщиностійкості δ_k залежить від марки бетону і зменшується із підвищенням міцності бетону R_{bt} .

Таблиця I

Марка бетону	B10	B15	B15*	B20	B20*	B25	B30	B35	B40
Границя міцності при одновісному розтязі									
а) проєктна R_{bt} , МПа	0,85	1,15	1,15	1,4	1,4	1,6	1,8	1,95	2,1
б) реальна R_{bt} , МПа	0,83	1,14	1,53	1,4	1,39	1,61	1,75	1,93	2,17
$K_{RT}\delta_k$, М $\times 10^{-2}$	4,85	2,63	3,01	1,91	2,31	1,57	1,25	1,18	0,89

Встановлено, що введення грубого базальтового волокна у бетонну суміш відчутно підвищує величину δ_k , а отже і тріщиностійкість бетону.

У роботі порівнюється дослідне, згідно літературних даних, та теоретичне, розраховане по запропонованій методиці тріщиноутворююче навантаження при короточасному статичному згині. В результаті встановлено, що вони дуже близькі в якісному відношенні. Однак в кількісному відношенні дослідне навантаження як правило перевищує розрахункове в середньому на 15%. Це можна пояснити тим, що теоретичний розрахунок ведеться по утворенню мікротріщин, а дослідне значення отримують при появі "видимих" тріщин. Аналіз випробувань, проведених Лучком Й.А., показує, що момент мікротріщиноутворення в середньому на 10% менший від моменту "видимого" тріщиноутворення. Тому доцільно проводити розрахунок по першій категорії тріщиностійкості (ВНДЛ 2.03.01-84) із відповідної поправкою.

При довготривалих навантаженнях методика дозволяє надійно обчислити момент тріщиноутворення в залежності від тривалості навантаження, а це досить зручно для розрахунку елементів у стадії експлуатації, що підтверджено експериментальними спостереженнями тривалістю до 500 діб.

Розрахунок допустимого недовготривалого розкриття тріщин по другій категорії тріщиностійкості проведений із врахуванням можливого відшарування бетону від арматури в області тріщин та росту їх довжини при дії додаткового короточасного навантаження. Співвідношення, одержані на основі запропонованої методики, дозволяють розраховувати критичне короточасне навантаження по гранично допустимій ширині розкриття тріщини на рівні центру ваги поперечного перерізу арматури, яке є нормативною характеристикою для елемента.

По третій категорії вимог тріщиностійкості визначали гранично допустиму ширину розкриття тріщини і допустиме короточасне та довготривале навантаження на залізобетонний балочний елемент.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних показує, що різниця між ними для напружень в арматурі не перевищує 10% для слабоармованих елементів. Ця різниця для розкриття тріщин при довготривалому згині не перевищувала в середньому 16% для дрібнозернистого бетону і 18% для трьохкомпонентного, причому для величин максимального розкриття, яке відповідає згасанню процесів повзучості ці відхилення менші і становлять відповідно 11% і 14%, що, очевидно, пояснюється похибками, які дають рівняння опису кривих повзучості на деяких відрізках часу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі співставлення результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними та аналізу літератури можна стверджувати, що застосування розрахункових моделей пружнопластичної механіки руйнування до бетону та залізобетону при короточасних та довготривалих навантаженнях, з точки зору врахування фізичних явищ руйнування більш коректне, і дає в ряді випадків кращі результати ніж застосування методик, рекомендованих діючими нормативними документами.

2. Ефективність застосування запропонованих методик розрахунку по нормальним тріщинам обмежується залізобетонними балочними елементами з коефіцієнтом армування не більше 3% при умові, що заповнювач в бетоні за лінійними розмірами повинен бути значно меншим довжини тріщини.

3. Встановлено, що у випадках, коли віддаль між арматур-

ними стержнями значно перевищує їх діаметр, значення K_{IH} суттєво змінюються вздовж фронту тріщини у її вершині, і цей фактор необхідно враховувати, беручи за розрахунковий параметр максимальне значення K_{IH} на проміжку між стержнями.

4. Теоретичними розрахунками встановлено, що явище порушення зчеплення арматури з бетоном в області контакту стержнів з поверхнею тріщин впливає на тріщиностійкість елементів, а довжина відрізка порушення зчеплення вздовж стержня є важливим додатковим розрахунковим параметром.

5. При труднощах доступу до бокової поверхні балочних елементів з метою контролю параметрів тріщин (ширини розкриття та довжини), розрахунок при короткочасних та довготривалих навантаженнях можна проводити по величині поверхневого розкриття тріщин на розтягнутій грані.

6. При розрахунках параметрів тріщиноутворення як при короткочасному, так і довготривалому згині враховуються характеристики тріщиностійкості бетону.

7. В результаті експериментів встановлено, що значення $K_{RT} - \delta_k$ для звичайних видів бетону залежить від його марки, причому зменшується з її підвищенням. Введення грубого бє-вальтового волокна підвищує δ_k для відповідної марки бетону, покращує його тріщиностійкість.

8. На основі нового підходу, пов'язаного з гіпотезами пружнопластичної механіки руйнування, запропонована ефективна методика розрахунку залізобетонних балочних елементів, яка дозволяє з єдиних позицій оцінювати тріщиноутворення та розвиток тріщин незалежно від виду бетону. Ефективність застосування цієї методики підвищується із зменшенням величини заповнювача, а найкращі результати дає її застосування до елементів з дрібнозернистих бетонів, очевидно через кращу відповідність їх структури моделі однорідного пружнопластичного тіла з тріщиною, ніж у випадку звичайних трьохкомпонентних бетонів.

Основний зміст дисертаційної роботи відбито у таких публікаціях:

І. Гембара Т.В., Луцко И.И. Распространение трещин в балке из вязко-упругого армированного материала при изгибе // Тез. докл. II Всесоюзной конференции "Механика неоднородных структур", 1987, Львов, Т.І, с. 64.

2. Андрейків А.Е., Лучко І.І., Гембара Т.В. Методи визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщин, ортогональних к арматурним стержням. Тез. докл. I Всесоюзного симпозиума "Механіка і фізика руйнування композитних матеріалів", 1988, Ужгород, с. 3.
3. Гембара Т.В. Експериментальне визначення параметрів тріщиностійкості бетону і базальтобетону. Там же, с. 100.
4. Голяня О.М., Гембара Т.В., Обухівський О.І. Метод визначення довжини і раскрытия тріщини в балочних зразках із бетону. Там же.
5. Лучко І.І., Гембара Т.В. Розповсюдження тріщин в балці при чистому згині в умовах установившоїся ползучості. Спротивлення матеріалів і розрахунок конструкцій. 1988, №53, с. 46-49.
6. Лучко І.І., Гембара Т.В. Дослідження фізико-механічних властивостей базальтобетону і перспектива його застосування в будівельних конструкціях Західного регіону УРСР. Композиційні матеріали на основі базальтових волокон. Зб. наукових праць ІПМ АН УРСР, Київ, 1989, с. 105-113.
7. Андрейків А.Е., Гембара Т.В., Лучко І.І. Розвиток тріщин внаслідок ползучості в згинаємих елементах, армованих стержневою арматурою. Тез. докл. IV Симпозиума "Прочність матеріалів і елементів конструкцій при складному напруженому стані", Севастополь, 1992. - С. 4-5.
8. Андрейків О.Б., Лучко І.І., Гембара Т.В. Метод визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в залізобетонних елементах з тріщинами при згині // ДЖМ.-1992. -№3.-С.104-110.
9. Гембара Т.В. Визначення раскрытия тріщин в армованих елементах при згині // Праці ХІІ наукової конференції молодих вчених інституту механіки АН України, Київ, 19-22 травня, 1992, ч. I., деп. в Укр НДІНТІ, с. 38-42.
10. Лучко І.І., Голяня О.М., Гембара Т.В. Устрій для вимірювання тріщини в залізобетонних конструкціях // Будівельні матеріали і конструкції. - 1992. - № 3-4, - С. 33-34.
11. Лучко І.І., Гембара Т.В., Квіт Р.І. Дослідження розвитку тріщини в бетоні та залізобетоні методами механіки руйнування // Тези доп. I міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків. Львів, 18-20 травня, 1993, с. 50-51.
12. Андрейків О.Б., Лучко І.І., Гембара Т.В. Розрахунок залізобетонних балочних елементів методами механіки руйнування. Львів, 1993, препринт № 183 ДМІ АН України, 60с (у друці).

Підписано до друку 24.05.93. Формат 60x84/16;
Обсяг I друк. лист. Сам. 425. Тир. 100. Безплатно.

Віддруковано офсетним способом
в учбово-експериментальній друкарні Українського
поліграфічного інституту імені Івана Федорова
м. Львів-4, вул. Дичаківська, 3

Безплатно.

AB 27.663