

УДК 691.5

ПРОГНОЗУВАННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ТА ФІБРОБЕТОНУ

В. П. СИЛОВАНЮК, Р. Я. ЮХИМ, Н. А. ІВАНТИШИН, А. Є. ЛІСНІЧУК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Запропонована розрахункова модель для прогнозування тріщиностійкості волокнистих композитів, створених на основі цементної матриці. Встановлено основні чинники, що формують опір композитного матеріалу поширенню у ньому тріщини. Отримано просту інженерну залежність для розрахунку характеристики тріщиностійкості K_{IC} , яка дає можливість цілеспрямовано формувати оптимальний склад композита.

Ключові слова: *тріщиностійкість, цементний камінь, мікрволокна, базальтова фібра, фібробетон.*

Одним із основних критеріїв у сучасних підходах під час вибору конструкційних матеріалів є їх тріщиностійкість. Для бетону характеристики тріщиностійкості особливо важливі, оскільки це крихкий матеріал і руйнується він, як правило, внаслідок поширення тріщини.

Зазвичай, досліджуючи тріщиностійкість бетонів, абстрагуються від їх структурної неоднорідності, вважаючи матеріал суцільним і однорідним [1–6]. Такий підхід до визначення тріщиностійкості бетону конкретного складу дає, безумовно, достовірні результати. Однак на їх основі неможливо прогнозувати зміну тріщиностійкості матеріалу за зміни параметрів однієї з фаз.

Для проектування нових із наперед заданими службовими властивостями композитних матеріалів на основі бетонної матриці важливе значення має встановлення кореляційних аналітичних залежностей для прогнозування та оцінювання тріщиностійкості цих матеріалів за механічними та геометричними параметрами їх структурних складників (пор, наповнювачів, армувальних елементів). Такі залежності дають можливість цілеспрямовано формувати оптимальний склад композита із заданими службовими характеристиками, зокрема, тріщиностійкістю.

Тріщиностійкість цементного каменю. Встановимо спочатку тріщиностійкість зв'язуючої фази композитного матеріалу – цементного каменю. Його основними дефектами є пори, розміри яких можуть змінюватись у широких межах від кількох мікрон до міліметра. Фронт макротріщини в такому матеріалі проходить через пори, внаслідок чого вершина тріщини затуплена з радіусом кривизни максимальних характерних пор ρ (рис. 1).

Тріщина відриву поширюватиметься за умови, що деформація ϵ_y в її околі досягне граничного значення ϵ_c . Деформацію на продовженні початково уже затупленої порами макротріщини встановимо на основі таких міркувань. Деформація уявного включення з нульовими пружними модулями, що заповнює фізичну тріщину в точці $x = a - \rho$ може бути виражена залежністю

$$\epsilon_y = \int_{2\rho}^{2\rho+\delta} \frac{dy}{y} = \ln \left(1 + \frac{\delta}{2\rho} \right), \quad (1)$$

де δ – розкриття тріщини в точці $x = a - \rho$. Згідно з теоремою про консервативність поля деформацій в еліптичному (еліпсоїдальному) включенні [7] та припущенням про еліптичну форму контуру тріщини біля вершини, деформацію на відрізку $a - \rho \leq x \leq a$ можна вважати однорідною.

З умови сумісності деформацій уявного включення і матриці в точці $x = a$ слідує, що деформацію матриці в околі макротріщини виражає залежність (1). Таким чином, умовою росту тріщини буде виконання рівності

$$\ln\left(1 + \frac{\delta_c}{2\rho}\right) = \epsilon_c, \quad (2)$$

де δ_c – критичне розкриття тріщини.

У механіці руйнування для крихких матеріалів відома залежність [8], що пов'язує розкриття тріщини δ з коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I :

$$\delta = \frac{(1 - \nu^2) K_I^2}{\sigma_0 \cdot E}. \quad (3)$$

Тут σ_0 – напруження в зоні передруйнування; E , ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу, відповідно. Беручи до уваги співвідношення (2), (3), отримуємо вираз для обчислення характеристики тріщиностійкості – граничного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC}

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{\sigma_0 E \rho (\exp \epsilon_c - 1)}{1 - \nu^2}}. \quad (4)$$

Враховавши залежність модуля пружності E цементного каменю від об'ємного вмісту пор [9]

$$E = E_m (1 - V_p^{2/3}), \quad (5)$$

а також отриману раніше [10] формулу для обчислення міцності цементного каменю залежно від вмісту дефектів типу тріщин

$$\sigma_B^c = \sigma_B (1 - \omega), \quad (6)$$

на основі виразу (4) отримуємо розрахункову залежність для прогнозування K_{IC}^c цементного каменю

$$K_{IC}^c = \sqrt{\frac{\sigma_B E_m (1 - V_p^{2/3}) \rho (\exp \epsilon_c - 1) (1 - \omega)}{(1 - \nu^2)}}, \quad (7)$$

де E_m – модуль пружності цементної матриці; V_p – об'ємний вміст пор; σ_B – границя міцності матеріалу матриці; ω – параметр, що відображає пошкодження матеріалу тріщинами; за напруження σ_0 тут прийнято границю міцності σ_B^c цементного каменю.

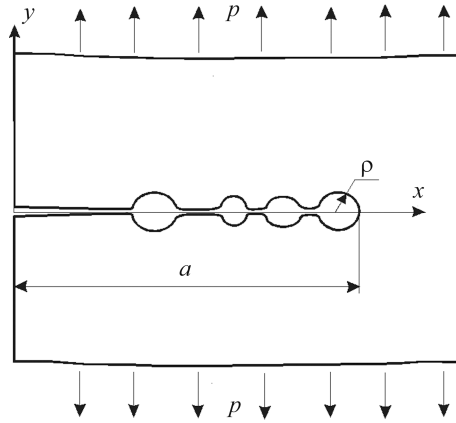


Рис. 1. Схематичне зображення контуру тріщини в матеріалі з порами.

Fig. 1. Schematic representation of the crack contour in a material with pores.

Тріщиностійкість фібробетону. Розглянемо тепер композитний матеріал – фібробетон, матрицею якого є цементний камінь, а армувальний матеріал – мікро-волокна (базальтові, скляні, вуглецеві тощо). Для таких матеріалів отримана [10] залежність для розрахунку їх міцності за розтягу

$$R_{bt}^f = (1 - \omega)(\lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{r \sigma_f}{l \sigma_m}\right) + \sigma_m (1 - V_f)), \quad (8)$$

де V_f – об’ємний вміст волокон; σ_f, σ_m – міцність волокон та цементного каменю, відповідно; l – довжина волокон; r – радіус волокна; λ – коефіцієнт приведення хаотичного армування до напрямленого ($\lambda = 1$ – для напрямленого армування вздовж осі розтягу; $\lambda = 0,33$ – для хаотичного).

Модуль пружності композита з порами можна розрахувати на основі формули [9]

$$E = E_m (1 - V_p^{2/3}) \left(1 + \frac{V_f}{(m/(m + V_p^{2/3} - 1)) - V_f^{1/3}}\right), \quad m = \frac{E_m}{E_f}, \quad (9)$$

де E_f – модуль пружності волокна.

Враховуючи співвідношення (4), (8), (9), отримуємо залежність для прогнозування тріщиностійкості композитного матеріалу

$$K_{IC}^f = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} \left((1 - \omega) \left(\lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{r \sigma_f}{l \sigma_m}\right) + \sigma_m (1 - V_f) \right) \times \right. \\ \left. \times \left(E_m (1 - V_p^{2/3}) \left(1 + \frac{V_f}{(m/(m + V_p^{2/3} - 1)) - V_f^{1/3}}\right) \right) \right) \rho (\exp \epsilon_c - 1)^{1/2}. \quad (10)$$

На основі отриманої формули графічно зображено (рис. 2) залежність параметра тріщиностійкості K_{IC}^f композитного матеріалу від об’ємного вмісту стохастично орієнтованої фібри різної природи та пошкодженості матеріалу порами і тріщинами. Механічні характеристики волокон подані у таблиці.

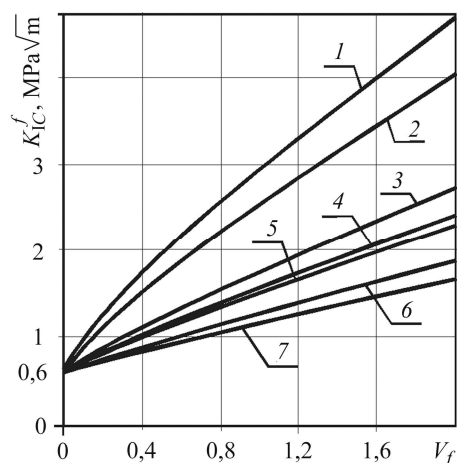


Рис. 2. Прогнозована тріщиностійкість цементного каменю, армованого фіброю:

- 1 – поліпропіленовою;
- 2 – поліакрилонітриловою;
- 3 – скляною; 4 – кевлар 149;
- 5 – базальтовою; 6 – вуглецевою;
- 7 – кевлар 29; $\rho = 15 \mu\text{m}$.

Fig. 2. Predicted fracture toughness of cement stone reinforced with fiber:
1 – polypropylene; 2 – polyacrylonitrile;
3 – glass fibers; 4 – Kevlar 149; 5 – basalt;
6 – carbon fibers; 7 – Kevlar 29; $\rho = 15 \mu\text{m}$.

Механічні характеристики фібри

Назва фібри	ϵ_c	Густина, g/cm ³	σ_B , МПа	E_f , GPa
Базальтова	0,033	2,65	1200	110
Скляна	0,048	2,46	3310	76
Кевлар 29	0,015	1,44	3620	41,4
Кевлар 149	0,036	1,47	3480	41,4
Поліпропіленова	0,15	1,18	500	38
Поліакрилонітрилова	0,11	2,65	500	75
Вуглецева	0,016	1,8	5100	228

Експериментальні дослідження. Щоб підтвердити достовірність отриманої аналітичної залежності (10), виконали експерименти для встановлення тріщиностійкості композита на основі цементної матриці за різного об'ємного вмісту базальтової фібри.

Для приготування розчинів використали фібру базальтову виробництва ТзОВ "Технобазальт-Інвест"; портландцемент ПЦ П/А-3-500 загально-будівельного призначення ПАТ "Волинь-Цемент"; гіперпластифікатор на основі полікарбоксилату Verament ТВ-1.

Експериментально встановлені характеристики тріщиностійкості армованого композитного матеріалу наведені на рис. 3 (ромби). Суцільна лінія відповідає теоретичному прогнозу тріщиностійкості, розрахованому на основі формули (10). Як видно, результати теоретичних розрахунків та експериментів достатньо добре узгоджуються між собою.

Зазначимо, що тріщиностійкість армованого цементного каменю в межах розглянутого об'ємного вмісту базальтової фібри зростає більш ніж у три рази.

Такий суттєвий ріст характеристики в'язкості руйнування модельного матеріалу дає підстави очікувати достатньо високі показники тріщиностійкості матеріалів, у яких застосовано базальтову фібру як мікроармувальну складову сучасних бетонів. Водночас необхідно і далі досліджувати вплив фібри на службові характеристики проектних бетонів, оскільки механізм її роботи у присутності щебеню та піску може дещо відрізнятись від розглянутого.

ВИСНОВКИ

Отримано розрахункову залежність для встановлення характеристики тріщиностійкості композитів на основі цементної матриці K_{IC} . Чинниками, що визначають тріщиностійкість матеріалу є пошкодженість матеріалу матриці тріщинами (ω) та порами (V_p); модулі пружності матриці (E_m) та наповнювача (E_f); об'ємний вміст фібри (V_f); гранична деформація композита (ϵ_c); міцність волокон

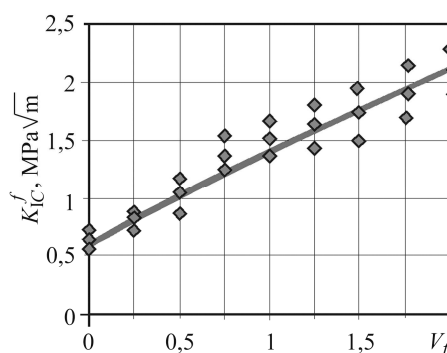


Рис. 3. Залежність тріщиностійкості композита від об'ємного вмісту базальтової фібри.

Fig. 3. Dependence of fracture toughness of the composite on the basalt fiber volume content.

(σ_f) та матриці (σ_m); довжина (l) та радіус волокон (r); радіус максимальних пор (ρ); коефіцієнт (λ), що характеризує орієнтацію волокон у композиті.

Розрахунки показали, що для забезпечення високої тріщиностійкості композита визначальним чинником є деформаційна здатність армувальних волокон. Найвищу тріщиностійкість матеріалу забезпечило армування поліпропіленовою фіброю, для якої характерна незначна міцність, але висока деформативність. Натомість армування цементного каменю високомодульними і міцними вуглецевими волокнами та кевларом призводить до створення міцних композитних матеріалів, але з дещо нижчими характеристиками тріщиностійкості.

РЕЗЮМЕ. Предложена расчетная модель для прогнозирования трещиностойкости волокнистых композитов, созданных на основе цементной матрицы. Установлены основные факторы, формирующие сопротивление композитного материала распространению в нем трещины. Получена простая инженерная зависимость для расчета характеристики трещиностойкости K_{IC} , которая дает возможность целенаправленно формировать оптимальный состав композита.

SUMMARY. The calculation model for predicting fracture of fibrous composites produced from the cement matrix is proposed. The main factors that form the resistance of composite material to crack propagation in it is established. The obtained simple engineering dependence for calculation of the crack growth resistance characteristics enables the purposeful creation of the optimum composition of the composite.

1. *Kaplan H. F.* Crack propagation and the fracture of concrete // *ACI Jornal.* – 1961. – **58**, № 5. – P. 531–610.
2. *Brown J. H.* Measuring of the fracture toughness of cement paste and mortar // *Mag. Concrete Res.* – 1972. – **24**. – P. 185–196.
3. *Naus D. J. and Lott J. L.* Fracture toughness of Portland cement concretes // *ACI Jornal.* – 1969. – **66**. – P. 481–489.
4. *Naus D. J., Batson J. B., and Lott J. L.* Fracture mechanics of concrete // *Fract. Mech. Ceram.* – 1974. – **2**. – P. 469–482.
5. *The Fracture Mechanics of Mortars / E. G. Evans and others* // *Cement and Concrete Research*, – 1976. – **6**, № 4. – P. 535–548.
6. *Зайцев Ю. В.* Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
7. *Eshelby J. D.* The stresses on and in a thin inextensible fibre in a stretched elastic medium // *Eng. Fract. Mech.* – 1982. – **16**, № 3. – P. 453.
8. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
9. *Браутман Л., Крок Р.* Композиционные материалы. Т. 5: Разрушение и усталость. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
10. *Розрахункова модель фібробетону на міцність за розтягу / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим, А. Є. Ліснічук, Н. А. Івантишин* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 3. – С. 39–45.

Одержано 08.04.2015