

деформування W , яку встановлюють за величинами напружень і деформацій у локальному об'ємі матеріалу перед вершиною тріщини, визначених експериментально методом цифрової кореляції зображень. Цей метод дає можливість вимірювати компоненти переміщень з роздільною здатністю в межах одного мікрона. За істинною діаграмою деформування матеріалу встановлюють величину відповідних напружень. За цими даними будують діаграми локального деформування матеріалу, з яких обчислюють критичну питому енергію деформування W_c .

Зокрема, було встановлено енергію руйнування сталі 65Г у вихідному стані і для матеріалу циклічної пластичної зони перед вершиною втомної тріщини. За відношенням цих енергій і пропонується визначати ступінь енергетичних втрат матеріалу за час попереднього циклічного навантаження:

$$R_w = 1 - \frac{W_c^п}{W_c^в} \quad (1)$$

де $W_c^в$ – енергія руйнування вихідного матеріалу за заданих умов (температура, середовище), $W_c^п$ – енергія руйнування матеріалу циклічної зони передруйнування.

РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ФІБРОБЕТОНІВ

А.Є. Ліснічук, Н.А. Івантишин, Р.Я. Юхим

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

Abstract. The model of deformation and fracture of composite based on cement matrix (fiber-reinforced concrete) under tension condition, which takes into account the micro-cracks and pores in the material structure and the presence of the reinforcing fibers is proposed. Calculation formulas for assessing the strength of fiber-reinforced concrete under tension on the basis of the model has been established.

Конструкційним матеріалом, що здатний вирішувати комплекс найскладніших задач у будівельній галузі є дисперсно армований бетон (фібробетон). Це композит на основі цементної матриці армований волокнами різної природи (сталеві, скляні, базальтові, вуглецеві, полімерні та деякі інші).

На сьогодні в основному широко використовуються три види армуючих волокнистих матеріалів: волокна у вигляді коротких відрізків тонкого сталюго дроту, скляні волокна і волокна на основі поліпропілену. Широке використання армованого бетону зумовлене вищими показниками міцності, тріщиностійкості, ударної в'язкості, меншим мікророзтріскуванням під час тужавіння порівняно з класичним бетоном.

Розглядаючи бетон як конгломерат цементного каменю, піску та щебеню, розрізняють три рівні його структури:

- Мікроструктура – структура цементного каменю;
- Мезоструктура – структура цементно-піщаного розчину;
- Макроструктура – структура щебеню і розчину.

Кожна з цих структур вносить свій вклад у міцність бетону однак значною мірою вона визначається міцністю цементного каменю.

Метою роботи є розробити математичну модель композитів на основі цементної матриці, що дасть можливість прогнозувати міцність таких матеріалів, тобто створювати матеріали із наперед заданими міцнісними властивостями.

У структурі цементного каменю розрізняють дві групи дефектів які впливають на його міцнісні характеристики: округлі типу порожнин (пори) і гострокінцеві типу тріщин. Гострокінцеві є визначальними в умовах розтягу матеріалу, оскільки викликають високу концентрацію напружень в околі вершин, внаслідок чого відбувається руйнування. Округлі

дефекти, навпаки, є достатньо безпечні за розтягу, а в умовах стиску ініціюють зони напружень розтягу, де і з'являються тріщини вже за навантажень, що складають 50% від руйнуючих [1].

Дослідимо деформування цементного каменю за одновісного розтягу. Моделювання реалізуємо в межах двовимірної моделі тіла. В реальних матеріалах тріщини та пори з тріщинами на їх контурі випадково орієнтовані відносно напрямку дії зусиль розтягу. Розглянемо випадок колінеарного розміщення нескінченного числа тріщин, як найбільш несприятливий варіант розміщення дефектів з точки зору міцності. Знехтуємо також впливом дефектів, що знаходяться в паралельних площинах, що збільшить запас розрахункової міцності. Таким чином, розглядаємо схему розміщення дефектів та навантаження тіла, як зображено на рис. 1.

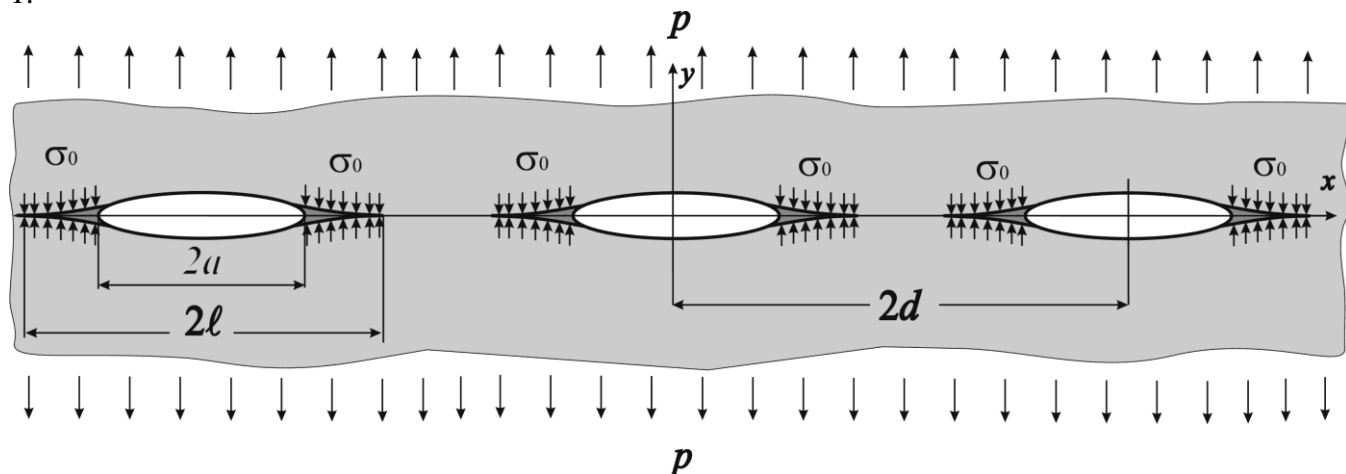


Рис. 1. Розрахункова схема розтягу матеріалу з тріщинами.

Враховуючи малий розмір тріщин концепція коефіцієнтів інтенсивності напружень тут незастосовна. Скористаємось відомим розв'язком цієї задачі у межах моделі Леонова–Панасюка [2, 3], де отримано співвідношення, що пов'язує інтенсивність зовнішнього навантаження p з розміром зони передруйнування

$$\cos\left(\frac{\pi p}{2\sigma_0}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{2d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{2d}\right)}. \quad (1)$$

Значення σ_0 еквівалентне границі міцності об'ємів цементного каменю між порами та тріщинами.

Прийнявши умову злиття зон передруйнування сусідніх тріщин за критерій руйнування матеріалу, отримуємо формулу яка дозволяє визначити границю міцності цементного каменю за розтягу

$$R_{bt}^c = p_* = \sigma_0 \left(1 - \frac{a}{d}\right). \quad (2)$$

Зазначимо, що відношення розмірів тріщини до відстані між ними a/d відображає вміст дефектів у матеріалі, тобто його пошкодженість.

Розглянемо тепер в умовах розтягу цементний камінь, армований мікрволокнами довільної жорсткості. Товщину цих волокон вважатимемо значно меншою від характерних розмірів домінуючих дефектів – пор та тріщин. Це припущення дає змогу розглядати матеріал між порами як однорідний з певними ефективними характеристиками. Армування неперервними або дискретними волокнами може бути як напрямленим так і хаотичним. Стимувальний вплив мікрволокон у зонах передруйнування виражаємо рівномірно розподіленими зусиллями σ_0^f . Їх інтенсивність описуємо відомою залежністю Келлі–Тайсона [4], модифікованою для довільного (направленого або хаотичного) дисперсного армування

$$\sigma_0^f = \lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) + \sigma_0 (1 - V_f), \quad (3)$$

де σ_f – міцність волокон; l_c – гранична неефективна довжина волокна; l – довжина волокна; V_f – об’ємний вміст фібри; λ – коефіцієнт приведення хаотичного армування до напрямленого [5] ($\lambda=1$ – для напрямленого армування вздовж осі розтягу; $\lambda=0,33$ – для хаотичного армування).

Враховуючи залежності (2), (3), отримуємо розрахункову формулу для прогнозування міцності композита (фібробетону) на основі цементної матриці

$$R_{bt}^f = \left(1 - \frac{a}{d} \right) \left(\lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) + \sigma_0 (1 - V_f) \right). \quad (4)$$

На рис. 2 наведено графічні залежності міцності матеріалів R_{bt}^f за різного об’ємного вмісту волокон базальту, поліпропілену, скла та вуглецю та пошкоджень у цементній матриці. Механічні характеристики волокон наведено у таблиці 1.

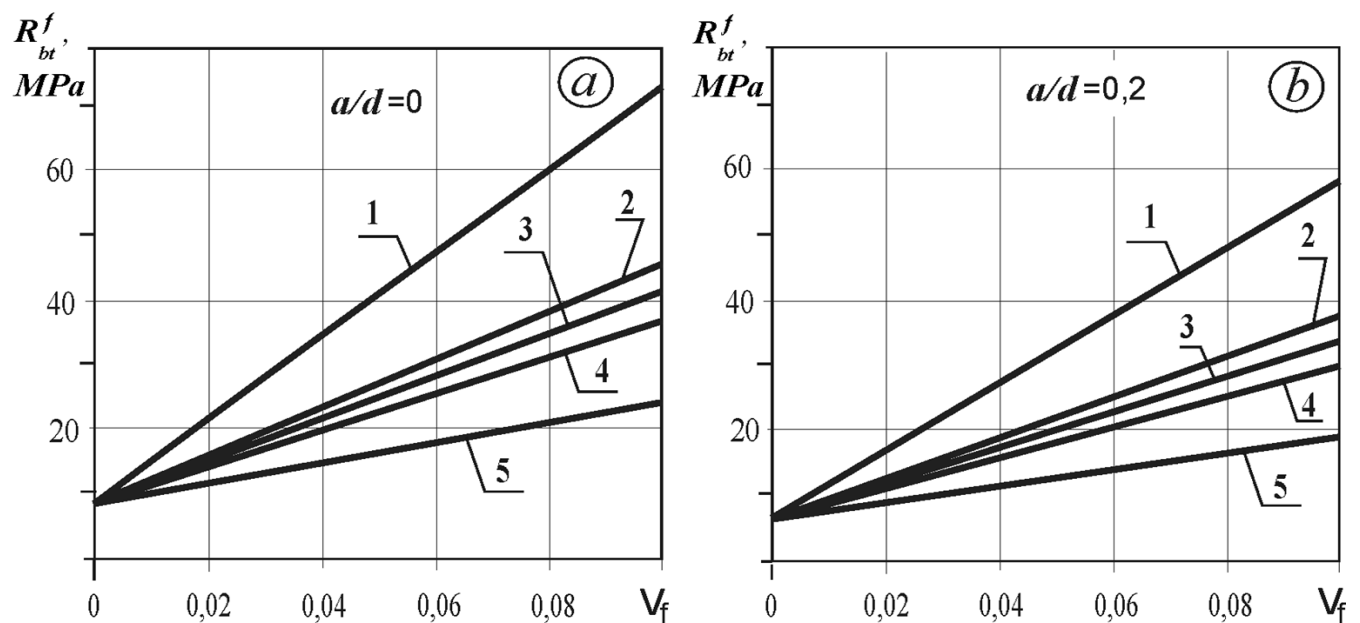


Рис. 2. Залежність прогнозованої міцності композита R_{bt}^f від об’ємного вмісту армувальних волокон: вуглецевих (1); базальтових (2); скловолокон (3); сталеві (4) та поліпропіленової фібри (5); за відсутності пор (a) та параметра пористості $a/d = 0,2$ (b).

Таблиця 1. Механічні характеристики фібри

Назва фібри	Густина, g/cm^3	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, ГПа
Базальтова	2,65	1200	12
Вуглецева	2	2000	245
Скляна	2,6	1050	75
Стальна	7,8	900	200
Поліпропіленова	0,9	500	5

З метою підтвердження достовірності отриманої аналітичної залежності (4) провели експерименти щодо встановлення міцності композиту на основі цементної матриці за різного об'ємного вмісту базальтової фібри. Для приготування розчинів використали такі матеріали: фібру базальтову; портландцемент ПЦ II/A-3-500; гіперпластифікатор.

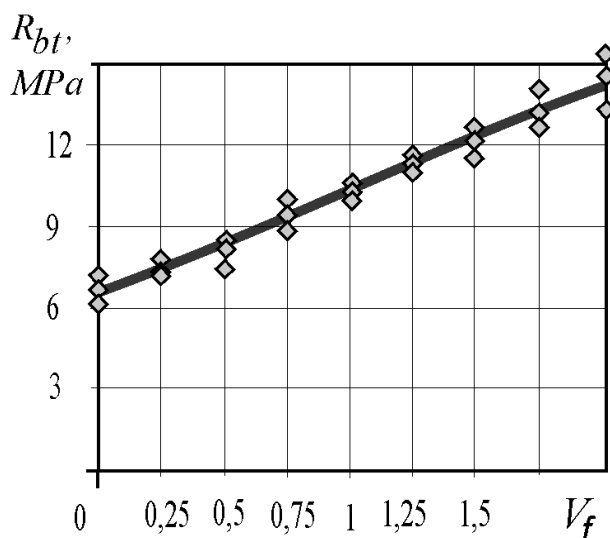


Рис. 3. Міцність на розтяг цементного каменю, армованого різним вмістом базальтової фібри.

На основі наведених компонент виготовлені призматичні зразки розміром 40×40×160 mm для випробування на розтяг при згині. Водоцементне співвідношення брали 0,4 з пластифікатором Verament ТВ- 1 в кількості 0,04% від маси цементу. В дослідженнях використовували фібру (ровінг) завдовжки 12 mm, яка у неексплуатованому стані має вигляд пучків ниток. Розчин перемішували до отримання однорідної суміші протягом 5 min, після чого ущільнювали на вібраційному столі з метою видалення повітряних бульбашок для зменшення кількості пор. Усі серії зразків до випробувань упродовж 27 днів знаходились у лабораторних умовах.

На рис. 3 розрахунковим даним відповідає суцільна лінія, точками позначено дані експериментів. Як видно, результати достатньо добре корелюють між собою. З наведених даних слідує, що міцність композиту на розтяг при 2% фібри

зростає більше ніж у два рази порівняно з базовим неармованим матеріалом.

Література

1. Marukha V. I., Panasyuk V. V., and Sylovanyuk V. P. Injection Technologies for Repair of Damaged Concrete Structures // Springer. – 2014. – 230 p.
2. Витвицький П. М. Пружнопластична рівновага пластинки з періодичною системою щілин // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1970. – № 6. – С. 524–527.
3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М. Наука, 1977. – 640 с.
4. Kelly A. And Tyson W. R. Fiberstrengthened materials // High-strength materials. – New York. – 1965. – № 6. – P. 578–600; Discuss. – P. 600–601.
5. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. – М.: – 2004. – 560 с.