

УДК 691.5

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ФІБРОБЕТОНУ НА МІЦНІСТЬ ЗА РОЗТЯГУ

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

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

Запропоновано модель деформування та руйнування композита на основі цементної матриці (фібробетону) за розтягу, яка враховує мікротріщини і пори в структурі матеріалу та наявність армувальних волокон. Встановлено розрахункові формули для оцінювання міцності фібробетону за розтягу. Проаналізовано вплив пористості та об'ємного вмісту армувальних волокон на міцність композита. Експериментальні дослідження та розрахунки свідчать про суттєве зростання міцності на розтяг за збільшення об'ємного вмісту фібри. Теоретичний прогноз міцності та експериментальні результати добре корелюють між собою.

Ключові слова: *міцність, цементний камінь, розрахункова модель, базальтова фібра, фібробетон.*

Композити на цементній основі, армовані волокнами різної природи, є одними із перспективних конструкційних матеріалів. Їх широке використання зумовлене прагненням спеціалістів суттєво підвищити такі показники бетону, як міцність, тріщиностійкість, ударну в'язкість, зменшити мікророзтріскування під час тужавіння [1, 2]. У будівництві як армувальні елементи бетонної матриці використовують широкий спектр волокон: сталеві, скляні, базальтові, вуглецеві, полімерні тощо. Як і в традиційних композитах на основі полімерних матриць, зміцнення волокнами базується на тому, що значну частину навантаження беруть на себе волокна, модулі пружності яких, як правило, вищі від матриці. На практиці використовують як напрямлене армування з використанням неперервних або коротких волокон, так і стохастичне.

Розраховують міцність фібробетону та конструкцій на його основі за допомогою методів теорії композиційних матеріалів, в основу яких покладено феноменологічні теорії міцності опору матеріалів [1–6]. Використовують також статистичні методи, у яких міцнісні характеристики композита пов'язані з варіацією міцності фаз у статистичному аспекті [7]. Застосування точних методів теорії пружності, в'язкопружності, механіки руйнування пов'язане зі складністю вибору адекватної, але доступної для аналізу математичної моделі.

Для визначення міцності композитів на цементній основі, які експлуатуються в умовах простих навантажень, існує – альтернативний теоретичним – експериментальний метод. Він дає змогу отримати достовірні результати щодо міцності матеріалу. Однак вони стосуються лише конкретного співвідношення складників композита і не дозволяють дати рекомендації для конструювання матеріалу із заданими службовими властивостями.

Мета роботи – на основі концепцій механіки руйнування розробити розрахункову залежність міцності фібробетонів від механічних характеристик цементної матриці та волокон, їх об'ємного вмісту, пористості матеріалу.

Розрахункова модель. Суттєву роль у міцності фібробетону відіграє бетонна матриця. Розглядаючи бетон як конгломерат цементного каменю, піску та ще-

беню, розрізняють мікроструктуру – структура цементного каменю; мезоструктуру – структура цементно-піщаного розчину; макроструктуру – структура системи щебінь–цементно-піщаний розчин (рис. 1).

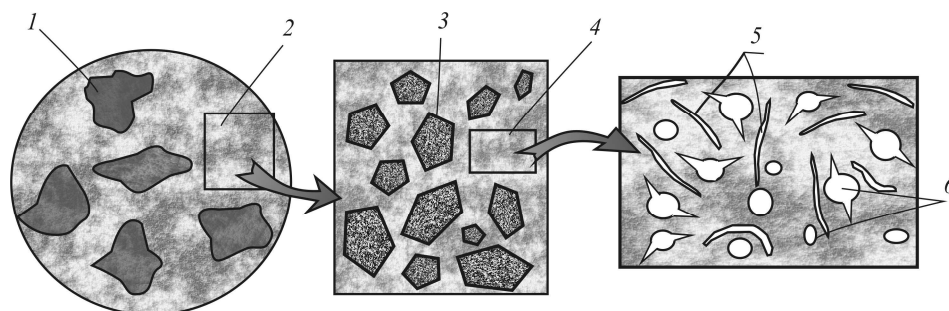


Рис. 1. Структура бетону: 1 – щебінь; 2 – цементно-піщаний розчин; 3 – пісок; 4 – цементний камінь; 5 – мікротріщини; 6 – пори.

Fig. 1. Concrete structures: 1 – gravel; 2 – cement-sand mortar; 3 – sand; 4 – cement stone; 5 – microcracks; 6 – pores.

Кожна з названих структур вносить свій вклад у міцність бетону. На основі експериментів та аналізу структур бетону [8] запропоноване співвідношення, що виражає міцність бетону на розтяг

$$R_{bt} = A_1 R_{bt}^m = A_1 \cdot A_2 \cdot R_{bt}^c, \quad (1)$$

де A_1, A_2 – безрозмірні коефіцієнти, що враховують якість макро- та мезоструктури бетону відповідно; R_{bt}^m, R_{bt}^c – границі міцності цементно-піщаного розчину та цементного каменю відповідно. Крім цього, це співвідношення вказує на те, що міцність бетону за розтягу залежить від параметрів макро- та мезоструктур бетону A_1, A_2 . У традиційних бетонах ці параметри змінюються в межах 0,5...1,5 і залежать від розмірів, міцності та якості підготовки заповнювачів (щебеню, піску). Із співвідношення (1) випливає також, що міцність бетону значною мірою зумовлена міцністю цементного каменю. Цементний камінь має капілярно-пористу будову із розміром пор до 100 μm . Його міцність на розтяг та стиск визначають за кількістю пор у структурі та їх розмірами.

Вплив пор на міцність цементного каменю з позицій механіки руйнування та методів статистики показано в монографії [9]. Отримано [10] розрахункову формулу, що визначає міцність цементного каменю залежно від кількості пор у матеріалі. Використано припущення про правомірність заміни стохастичного розміщення пор у цементному камені регулярним.

У структурі цементного каменю розрізняють дві групи дефектів: округлі – типу порожнин (пори) і гострокінцеві – типу тріщин. До останніх також можна віднести пори з тріщинами на контурі. Між цими достатньо крупними дефектами містяться також дефекти субмікроструктури розміром 0,1...1 μm , які не братимемо до уваги, вважаючи матеріал у цих об'ємах однорідним.

Зазначені дефекти структури цементного каменю відіграють різну роль під час деформування і руйнування матеріалу за розтягу і стиску. 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 становлять 50% від руйнуючих [10].

Розглянемо деформування цементного каменю за одновісного розтягу. Моделювання реалізуємо в межах двовимірної моделі тіла. Тріщини та пори з трі-

щинами на контурі у матеріалі випадково орієнтовані відносно напрямку дії зусиль розтягу. Припустивши, що в одній із площин, перпендикулярній до осі розтягу, тріщиноподібні дефекти колінеарні, отримаємо найнижчу міцність матеріалу через таку орієнтацію тріщин. 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. 2.

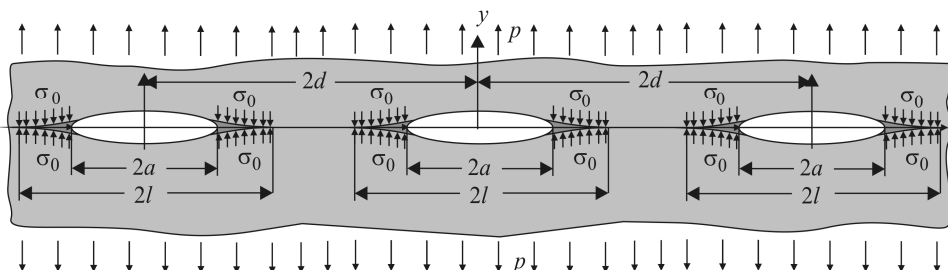


Рис. 2. Схема розміщення колінеарних тріщин.

Fig. 2. Scheme of collinear cracks location.

З огляду на малі розміри тріщин і незастосовності до них концепції коефіцієнтів інтенсивності напружень, скористаємось відомим розв'язком задачі [11, 12] про колінеарну систему тріщин (рис. 2) у межах моделі Леонова–Панасюка. В цих працях отримали співвідношення, що пов'язує інтенсивність зовнішнього навантаження p з розміром зони передруйнування

$$p = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \arccos \left(\sin \left(\frac{\pi a}{2d} \right) / \sin \left(\frac{\pi l}{2d} \right) \right). \quad (2)$$

Тут за σ_0 позначено границю міцності об'ємів цементного каменю між порами та тріщинами.

Прийнявши умову злиття зон передруйнування сусідніх тріщин за критерій руйнування матеріалу, отримуємо формулу для оцінки границі міцності цементного каменю за розтягу

$$R_{bt}^c = p_* = \sigma_0 \left(1 - \frac{a}{d} \right). \quad (3)$$

Тут 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 мікрочолокнами довільної жорсткості (рис. 3).

Товщину цих волокон вважатимемо значно меншою від характерних розмірів домінуючих дефектів – пор з тріщинами на контурі та власне тріщин. Це припущення дає змогу розглядати матеріал між порами як однорідний з певними ефективними характеристиками. Армування неперервними або дискретними чолокнами може бути як напрямленим, так і хаотичним.

Запропонована вище розрахункова схема дає можливість для армованого цементного каменю отримати залежність для встановлення міцності на розтяг композита. Для цього стримувальний вплив мікрочолокн у зонах передруйнування виражаємо рівномірно розподіленими зусиллями σ_0^f . Їх інтенсивність описуємо відомою залежністю Келлі–Тайсона [13], модифікованою для довільного (направленого або хаотичного) дисперсного армування

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

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

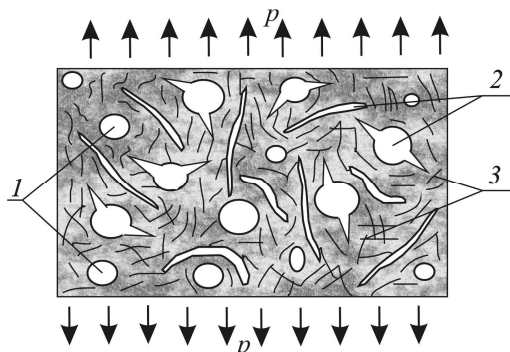


Рис. 3. Схема армованого цементного каменю з порами: 1 – пори; 2 – тріщини; 3 – мікрволокна.

Fig. 3. Scheme of reinforced cement with pores: 1 – pores; 2 – cracks; 3 – microfiber.

Встановлення величини l_c в точній постановці є досить складною задачею теорії пружності. Раніше наведено [12] достатньо громіздкий вираз для обчислення l_c , отриманий наближеним методом. У механіці композитів використовують припущення, що дотичні напруження τ на циліндричній поверхні волокна є сталими і з рівняння його рівноваги отримують просту залежність

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot r}{\tau}, \quad (5)$$

де r – радіус волокна. Враховуючи залежності (3), (4), отримуємо розрахункову формулу для прогнозування міцності волокнистого композита (фібробетону) на основі цементної матриці

$$R_{bt}^f = \left(1 - \frac{a}{d}\right) \left(\lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_0 (1 - V_f) \right). \quad (6)$$

Наведені (рис. 4–6) графічні залежності міцності матеріалів R_{bt}^f від об'ємного вмісту волокон базальту, поліпропілену, скла та вуглецю і пошкоджень у цементній матриці. Механічні характеристики волокон наведені у табл. 1.

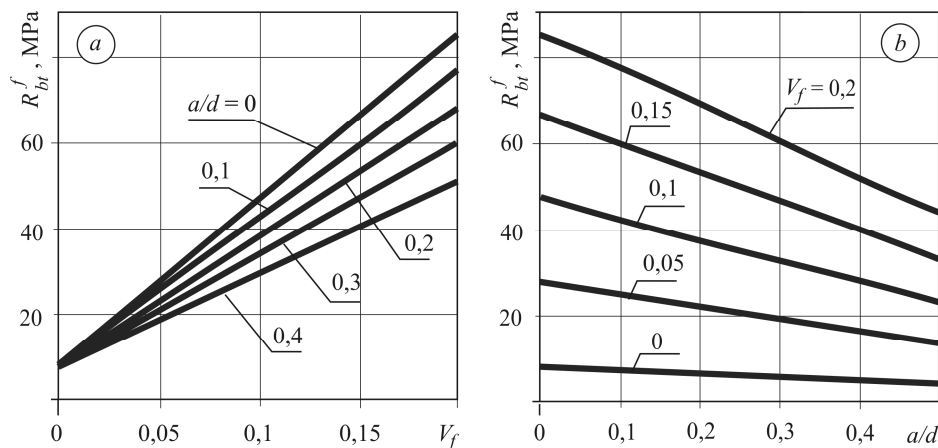


Рис. 4. Прогнозування залежності міцності композита R_{bt}^f від об'ємного вмісту базальтових волокон (a) та кількості тріщин у матеріалі (b).

Fig. 4. Prediction of dependence of the strength of composite R_{bt}^f on the volume content of reinforcing basalt fibers (a) and a number of cracks in the material (b).

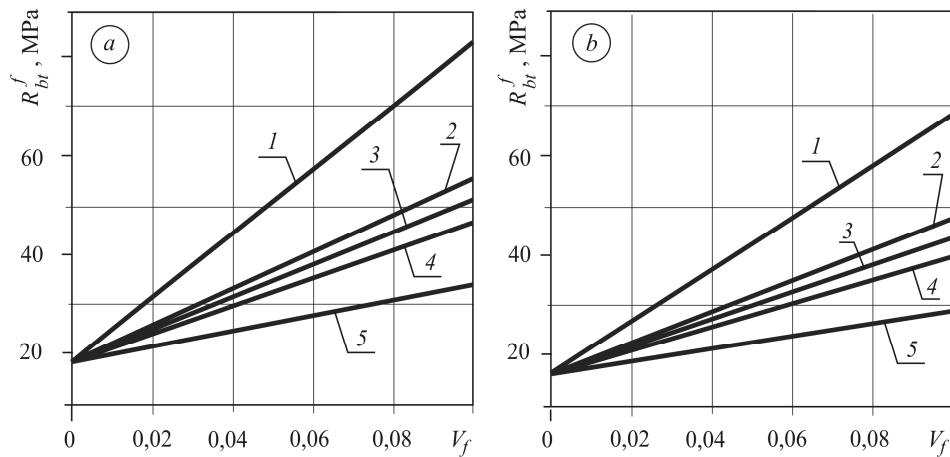


Рис. 5. Залежність прогнозованої міцності композита R_{bt}^f від об'ємного вмісту армувальних вуглецевих (1), базальтових (2) волокон, скловолокон (3), сталевих (4) і поліпропіленової (5) фібри за відсутності пор (a) та пористості $a/d = 0,2$ (b).

Fig. 5. Dependence of the estimated strength of the composite R_{bt}^f on the volume content of reinforcing carbon (1), basalt (2) fibers, glass fibers (3), steel (4) and polypropylene fiber (5), with no pores (a) and with porosity parameter $a/d = 0.2$ (b).

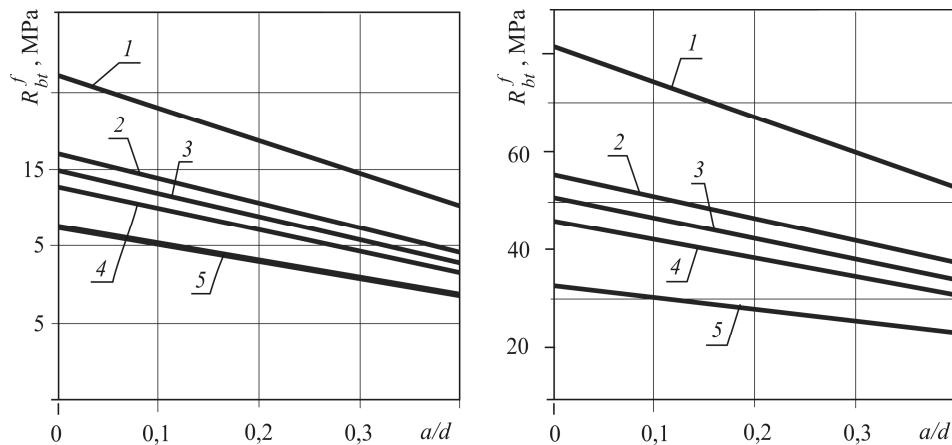


Рис. 6. Залежність прогнозованої міцності композита R_{bt}^f від пористості цементного каменю, коли $V_f = 0,02$ (a) та $V_f = 0,1$ (b), за наявності армувальних вуглецевих (1), базальтових (2) волокон, скловолокон (3), сталевих (4) та поліпропіленової (5) фібри.

Fig. 6. Dependence of estimated composite strength R_{bt}^f on cement stone porosity, when $V_f = 0.02$ (a) and $V_f = 0.1$ (b), at the presence of reinforcing carbon (1), basalt (2) fibers, glass fibers (3), steel (4) and polypropylene (5) fiber.

Експериментальні дослідження. Щоб підтвердити достовірність отриманої аналітичної залежності (6), здійснили експерименти для встановлення міцності композита на основі цементної матриці за різного об'ємного вмісту базальтової фібри.

Для приготування розчинів використали такі матеріали:

- фібру базальтову (виробництва ТОВ “Технобазальт-Інвест” (табл. 1));
- портландцемент ПЦ П/А-3-500 загально-будівельного призначення (ПАТ “Волинь-Цемент”);
- гіперпластифікатор на основі полікарбосилату Verament ТВ-1.

Таблиця 1. Механічні характеристики фібри

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

На основі цих компонент виготовлені призматичні зразки розміром 40×40×160 mm для випробування на розтяг за згину. 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 упродовж 5 min, після чого ущільнювали на вібраційному столі для видалення повітряних бульбашок, щоб зменшити кількість пор. Усі серії зразків до випробувань перебували 27 днів у лабораторних умовах.

Міцність на розтяг матеріалу визначали згідно зі схемою триточкового згину. Результати випробувань наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Міцність на розтяг за згину цементного каменю, армованого базальтовою фіброю

№ серії зразків	Об'ємний вміст фібри, %	Граничне навантаження за згину, kg	Міцність на розтяг, МПа
1	0	265...300	6,21...7
2	0,25	295...320	6,91...7,5
3	0,5	320...355	7,5...8,32
4	0,75	380...420	8,9...9,84
5	1	430...450	10,1...10,54
6	1,5	495...530	11,6...12,42
7	2	560...670	13,12...15,7

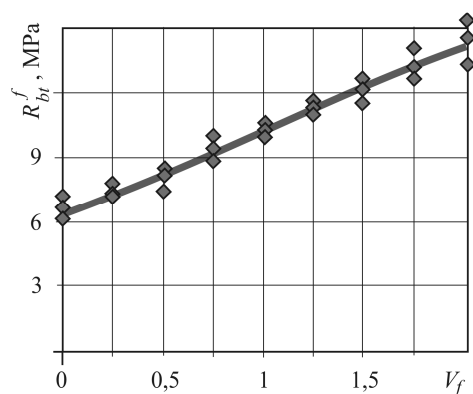


Рис. 7. Міцність на розтяг за згину цементного каменю, армованого різним вмістом базальтової фібри: суцільна лінія – розрахункові результати; \diamond – експеримент.

Fig. 7. Tensile strength of reinforced cement with different content of basalt fiber: solid line – estimated results; \diamond – experiments.

Усі серії армованих зразків мали гладкий злам, що не містив витягнутих з матриці волокон. Це свідчить про високу адгезію базальтового волокна з матрицею, зростання міцності та структурну єдність композита.

Результати експериментального визначення міцності зображені графічно (рис. 7). Як бачимо, графік практично лінійний, що можна описати залежністю

$$R_{bt} = 390 \cdot V_f + 6,5. \quad (7)$$

В отриманій теоретично розрахунковій формулі (6) залежність міцності від об'ємного вмісту фібри теж виражається лінійною функцією.

Як бачимо (рис. 7), розрахункові результати достатньо добре узгоджуються з теоретичними. З наведених даних слідує, що міцність композита на

розтяг при 2% фібри зростає більше ніж у два рази порівняно з базовим неармованим матеріалом.

ВИСНОВКИ

У межах концепції механіки руйнування отримана аналітична залежність для прогнозування міцності на розтяг композита на основі цементної матриці. Параметрами в розрахунковій формулі є об'ємні вмісти фібри, матриці та тріщиноподібних дефектів, границі міцності складників композита, геометричні характеристики фібри тощо. Розрахунки свідчать про суттєвий вплив дефектності цементної матриці на міцність композита. Порівняння теоретичних оцінок міцності композита з експериментальними результатами свідчить про достатньо високу достовірність прогнозу міцності за запропонованою тут розрахунковою схемою.

РЕЗЮМЕ. Предложена модель деформирования и разрушения композита на основе цементной матрицы (фибробетона) при растяжении, которая учитывает микротрещины и поры в структуре материала и наличие армирующих волокон. Установлены расчетные формулы для оценки прочности фибробетона на растяжение. Проанализировано влияние пористости и объемного содержания армирующих волокон на прочность композита. Экспериментальные исследования и расчеты свидетельствуют о существенном росте прочности на растяжение при увеличении объемного содержания фибры. Теоретический прогноз прочности и экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой.

SUMMARY. The model of deformation and fracture of the composite based on cement matrix (fiber-reinforced concrete) under tension, 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 are established. The influence of porosity and volume content of the reinforcing fibers on the strength of the composite are analyzed. The results of experimental studies and calculations indicate a significant increase in tensile strength with increasing fiber volume content. Theoretical prediction and experimental strength data agree very well. This allows us to use the dependencis when creating composites with desired characteristics on the basis of the concrete matrix.

1. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. – М.: АСВ, 2004. – 560 с.
2. Баженов Ю. М. Технология бетона. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.
3. Brandt A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance II Spon Press redition. – 2009. – March. – 544 p.
4. Jefferey M. and Lemm НВ Tiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and applications (Building Materials Science) // William Andrew. – 1990. – 194 p.
5. Maidl B. Steel Fibre Reinforced Concrete // Wiley. – 1995. – 292 p.
6. Пухаренко Ю. В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 10. – С. 47–60.
7. Композиционные материалы / Под ред. Л. Браутман, Р. Крок. – М.: Мир, 1978. – 5. – 488 с.
8. Грушко И. М., Ильин А. Г., Чихладзе Э. Д. Повышение прочности и выносливости бетона. – Харьков: Высш. шк., 1986. – 152 с.
9. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
10. Marukha V. I., Panasyuk V. V., and Sylovanyuk V. P. Injection Technologies for Repair of Damaged Concrete Structures // Springer. – 2014. – 230 p.
11. Витвицький П. М. Пружнопластична рівновага пластинки з періодичною системою щілин // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1970. – № 6. – С. 524–527.
12. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М. Наука, 1977. – 640 с.
13. Kelly A. And Tyson W. R. Fiberstrengthened materials // High-strength materials. – New York. – 1965. – № 6. – P. 578–600; Discuss. – P. 600–601.

Одержано 15.12.2014