

УДК: 691.3

Р.Я. Юхим, А.Є. Ліснічук, Н.А. Івантишин*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка***МІЦНІСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ, АРМОВАНОГО МІКРОВОЛОКНАМИ ЗА СТИСКУ**

Сформульована розрахункова модель для прогнозування міцності армованого мікрОВОлокнами цементного каменю за стиску. Отримана аналітична залежність міцності матеріалу від механічних характеристик цементного каменю та фібри, їх об'ємного вмісту, параметрів, що характеризують ступінь пористості матриці. Результати проведених експериментів на стиск призматичних зразків, виготовлених із армованого базальтовими волокнами цементного каменю добре корелюють із отриманими розрахунковими даними.

Ключові слова: міцність за стиску, цементний камінь, армування, фібра.

Р.Я. Юхим, А.Е. Лисничук, Н.А. Івантишин**ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, АРМИРОВАННОГО МИКРОВОЛОКНА ЗА СЖАТИЯ**

Сформулирована расчетная модель для прогнозирования прочности армированного микроволокнами цементного камня при сжатии. Получена аналитическая зависимость прочности материала от механических характеристик цементного камня и фибры, их объемного содержания, параметров характеризующих степень пористости матрицы. Результаты проведенных экспериментов на сжатие призматических образцов изготовленных из армированного базальтовыми волокнами цементного камня хорошо коррелируют с полученными расчетными данными.

Ключевые слова: прочность при сжатии, цементный камень, армирование, фибра.

R.Ya. Yukhym, A.Ye. Lisnichuk, N.A. Ivantyshyn**COMPRESSIVE STRENGTH OF MICROFIBRE REINFORCED CEMENT STONE**

Calculation model for predicting the compressive strength of fiber reinforced cement stone was formulated. The analytical formula of strength composite materials dependence of the mechanical properties of the cement stone and fiber, they volume content, parameters that characterize the degree of porosity of the matrix was obtained. The results of experiments on prismatic specimens maded from reinforced basalt fiber cement stone under compression well correlate with the calculated data.

Keywords: compressive strength, cement stone, reinforcement, fiber.

Постановка проблеми. Ефективним методом підвищення характеристик міцності бетонів, які використовують при будівництві промислових та житлових об'єктів є дисперсне армування волокнами (фіброю). Введення в цементні розчини будівельного волокна сприяє більш повній і рівномірній гідратації цементу, що веде до зниження інтенсивності процесів тріщиноутворення, підвищує міцність готового виробу на розтяг і згин, ударну міцність, в'язке руйнування, опір стиранню, при цьому знижується ефект деформації повзучості і усадки. Перераховані особливості фібробетонів сприяють значному збільшенню терміну їх експлуатації. Хоча застосування дисперсного армування в будівельній практиці відоме давно, однак, лише в останні десятиліття ведуться наукові дослідження з моделювання поведінки фібробетону та оптимізації сумішей. Найбільш поширеними фібрами, які використовують у промисловості є скляні, поліпропіленові, базальтові, металеві та деякі інші. Їх фізико-механічні властивості наведені в таблиці 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
Стальна	7,8	900	200
Поліпропіленова	0,9	500	5
Азбестова	2,6	1000	68

Наведені волокна мають різні механічні характеристики, у зв'язку з чим і різні сфери застосування, відрізняються способом введення в розчини, а також мають ряд модифікацій (структура поверхні, товщина і довжина окремого волокна, наявність замаслювача і т.д. Діаметр фібр лежить в межах від кількох мікрометрів до міліметра. Поперечний переріз волокон може бути круглим, овальним, полігональним та іншої форми в залежності від призначення фібри та процесу її виготовлення. За діаметром волокон фібру ділять на дві категорії – мікро і макро. До мікрофібри відносять волокна, товщина яких менша 300 μm . Об'ємний вміст фібри зазвичай не перевищує 5% і визначається метою, з якою вона вводиться у розчин. Для запобігання мікророзтріскуванню бетону при усадці та температурних змінах доцільно вводити від 0,1% до 0,3% фібри від маси цементу. Вищі об'ємні вмісти фібри дозволяють підвищити несучу здатність елементів бетонних конструкцій.

Сталефібробетони застосовують в більшій мірі на промислових об'єктах з важкими експлуатаційними умовами. Без нього неможливе будівництво промислових вібростійких споруд – підлоги, залізничні шпали, плити для будівництва доріг, аеродромів та мостів.

Склофібробетон поширений при виготовленні декоративних конструкцій, фасадних панелей під натуральний камінь, об'ємних і криволінійних елементів складних форм для реставрації історичних будівель. У промисловому будівництві з нього виготовляють незнімну опалубку, використовують на гідротехнічних об'єктах і об'єктах хімічної промисловості. Із склофібробетону доцільно споруджувати легкі іригаційні і дренажні системи, що характеризуються високою морозостійкістю та водопроникністю.

Фібробетон на основі поліпропіленових волокон має вузьку сферу застосування, оскільки волокна мають більш низькі механічні і армуючі характеристики порівняно зі сталлю і скловолокном. Його застосовують переважно для заливання підлоги при зведенні промислових і цивільних будівельних об'єктів. В окремих випадках використовують фібри із різних матеріалів або одного різних розмірів для досягнення необхідних властивостей фібробетону. Набуває популярності армування фіброю пінобетону. Отриманий композит володіє більшою міцністю, водночас зберігає позитивні якості пінобетону — малу вагу з низькими показниками теплопровідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені експериментальні і теоретичні дослідження [1-13] показують, що дисперсне армування бетону підвищує міцність елементів конструкції на розтяг та згин, збільшує тріщиностійкість та ударну в'язкість матеріалу, покращує інші його фізико-механічні характеристики. Використання фібрового армування є передумовою довговічності будівельних об'єктів, веде до зниження трудовитрат на проведення арматурних робіт, скорочує терміни виконання робіт та знижує економічні витрати за рахунок досягнення проектних характеристик при меншій матеріалоемності конструкції.

Для прогнозувати міцнісних характеристик фібробетону застосовують теоретичні моделі, які базуються на засадах механіки композитних матеріалів, таких як використання правила сумішей з врахуванням об'ємного вмісту фаз композиту [10]. Такі підходи дозволяють апроксимувати міцність композитів, не розкриваючи фізичної суті явища деформування і руйнування композиту.

Існує чимало факторів, що впливають на зміну властивостей композитів на основі цементної матриці, що в свою чергу дає багато варіантів їх комбінування для створення матеріалів із необхідними характеристиками. Для цього потрібно розвивати теорії, що враховують дискретну структуру матеріалів. В роботах [14, 15] на основі концепцій механіки руйнування побудовано розрахункові моделі для прогнозування міцності та тріщиностійкості композитів на основі цементної матриці, що враховують порову структуру матриці та тріщини в цементному камені.

Постановка завдань. Метою даної роботи є побудова розрахункових залежностей для прогнозування міцності фібробетону за стиску. Варто відмітити, що відомі в літературі експериментальні дослідження з цієї проблеми містять неоднозначні, а іноді й суперечливі дані стосовно впливу армування фіброю на міцність композиту за стиску.

Розрахункова модель фібробетону за стиску. Основною службовою характеристикою бетону, яку використовують при проектуванні конструкцій та при контролі якості бетону є його міцність на стиск. Міцність бетону на стиск, у порівнянні з розтягом, вища у 8 разів для класу бетону В5 і зростає до 15 раз і вище для марки В40. Суттєву роль у виникненні тріщин в структурі бетону за стиску відіграють пори. Пори в цементному камені мають різне походження і розміри їх змінюються в широких межах (таблиця 2).

Розподіл і класифікація пор в ц пор в цементному камені

Вид пор в ЦК	Інтервал за діаметром, нм	Характерні діаметри, нм
Гелеві	до 20	4
Проміжні	20÷50	30-40
Капілярні:	50÷2000	
- мікро	50÷200	60-80
- макро	200÷2000	300, 1400
Макропори	$(100\div 1000)\cdot 10^3$	

Пори цементного каменю мають довільну форму і випадкову орієнтацію по відношенню до зовнішнього навантаження. В роботі [16] показано, що за умов стиску напруження розтягу, що виникають в околі пор, мало залежать від їх форми. Побудову моделі деформування за стиску цементного каменю здійснимо в рамках плоскої задачі теорії пружності.

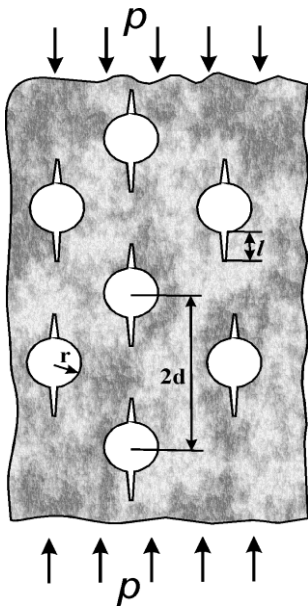


Рис. 1. Схема стиску армованого цементного каменю з порами

За розрахункову модель міцності на стиск цементного каменю, стохастично армованого мікрОВОлокнами, візьмемо товсту пластину із системою періодичних кругових отворів (пор) з тріщинами на контурі (рис.1). За межами пор маємо армований матеріал з мікропорами, який не вносять вагомому вкладу в поширення тріщини, хоча і є концентраторами напружень. Його поведінку моделюємо однорідним ізотропним середовищем із ефективними пружними характеристиками E, ν . Припускаємо, що концентрація великих пор є такою, що їх взаємодією можна знехтувати. Тоді утворення та поширення тріщин на контурі пор можна дослідити на прикладі одного ізольованого отвору.

Згідно з відомими розв'язками теорії пружності біля кругового отвору в тілі (рис. 2) під час його стискування виникає зона розтягальних напружень, величину яких можна розрахувати за формулою [17]

$$\sigma_{yy}(x,0) = -p \left(\frac{1}{2} \frac{r^2}{x^2} - \frac{3}{2} \frac{r^4}{x^4} \right). \quad (1)$$

Напруження, розраховані за формулою (1) зображено на рис. 3. В інтервалі $(r < x < 1,7r)$ виникають напруження розтягу, а при $x > 1,7r$ – напруження змінюють знак і стають стискальними.

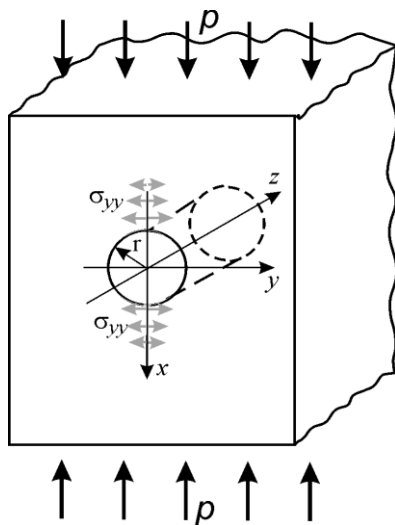


Рис. 2. Схема стиску тіла з круговим циліндричним отвором

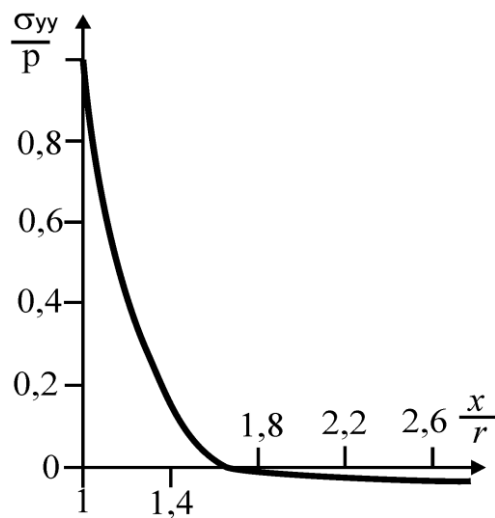


Рис. 3. Розподіл напружень $\sigma_{yy}(x,0)$ біля кругового отвору за стиску вздовж осі x

За достатньої інтенсивності зовнішнього навантаження стиску напруження розтягу ініціюють появу тріщин на контурі порожнини (рис. 4). Експериментальні дослідження показують, що тріщини в цементному камені виникають вже при інтенсивності навантажень $p \sim (0,5 \dots 0,6) R_b$. Тут R_b - міцність матеріалу на стиск.

Граничні навантаження для росту цих тріщин можна розрахувати за встановленою у роботі [16] залежністю

$$p^* = \sqrt{\frac{\pi(1+\lambda)^7}{4r((1+\lambda)^2-1)}} K_{IC}, \quad (2)$$

де K_{IC} - характеристика локальної тріщиностійкості матеріалу; $\lambda = l/r$.

Розвиток цих тріщин спочатку нестійкий, тобто вони поширюються до розмірів $l = \lambda_0 r$ без збільшення навантаження (рис. 5). Далі навантаження для росту тріщини необхідно збільшувати.

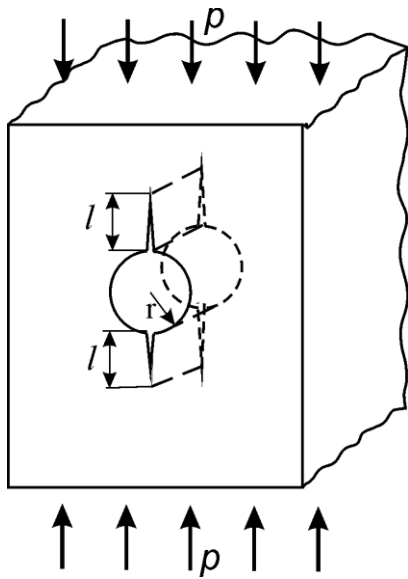


Рис. 4. Тіло з круговим циліндричним отвором та тріщинами в умовах стиску

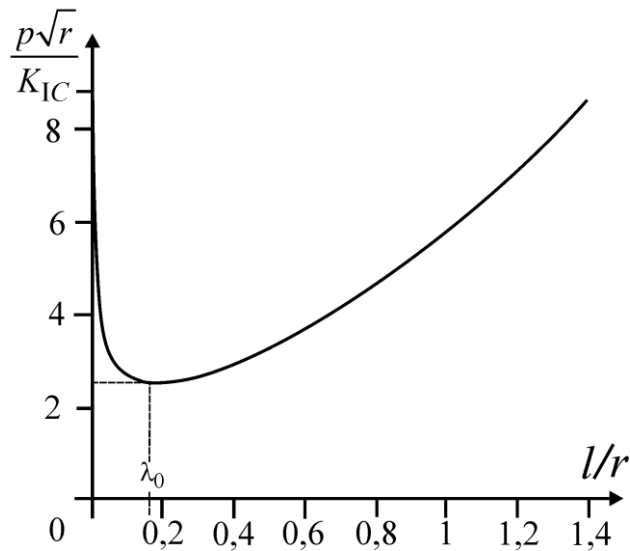


Рис. 5. Залежність граничного навантаження від довжини тріщини

Зовнішні навантаження, за яких тріщини зливаються в одну, що перетинає все тіло, приймаємо за границю міцності композиту за стиску. Цю характеристику встановлюємо за формулою (2), покладаючи довжину тріщини l рівною половині відстані між порами $d - r$:

$$R_b = \sqrt{\frac{\pi(1+\lambda_c)^7}{4r((1+\lambda_c)^2-1)}} K_{IC}, \quad \lambda_c = \frac{d}{r} - 1. \quad (3)$$

Якщо адгезія матриці із мікрволокнами при зростанні інтенсивності навантаження стиску аж до руйнування не порушується, то для розрахунку K_{IC} можна застосувати раніше отриману в роботі [15] залежність

$$K_{IC} = \frac{1}{\sqrt{1-\nu^2}} \left(\left(0,33\sigma_f V_f \left(1 - \frac{r\sigma_f}{a\sigma_m} \right) + \sigma_m (1-V_f) \right) \times \right. \\ \left. \times \left(E_m \left(1 + \frac{V_f}{(m/(m-1)) - V_f^{1/3}} \right) \right) \rho (\exp \varepsilon_c - 1) \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Тут σ_f , σ_m – границі міцності фібри і цементної матриці відповідно; E_f , E_m – модулі пружності фібри і матриці; V_f – об’ємний вміст фібри; ε_c – гранична деформація композиту; ν – коефіцієнт Пуассона композиту; ρ – параметр структури матеріалу; a – довжина волокон; $m = E_f / E_m$.

Реально в композиті за умов стиску внаслідок різниці в модулях пружності матриці і армуючих волокон вздовж поверхонь їх розділу виникають дотичні напруження, які за достатньої інтенсивності зовнішнього навантаження призводять до порушення адгезії між фазами з утворенням поля мікротріщин. Взаємодія макротріщини з мікротріщинами разом з втратою впливу армування на тріщиностійкість внаслідок декогезії веде до зменшення параметра тріщиностійкості матеріалу K_{IC} , а отже, згідно зі співвідношенням (3), і до зниження міцності на стиск. На наш погляд, це одна з головних причин незначного зростання, а часто і зменшення міцності на стиск композитів на основі цементної матриці зі збільшенням об'ємного вмісту армуючих волокон.

Зниження опору поширенню тріщини внаслідок мікророзтріскування матеріалу за стиску, можна виразити наближено залежністю [18]

$$K_{IC} = K_{IC}^0(1 - f_s) \quad (5)$$

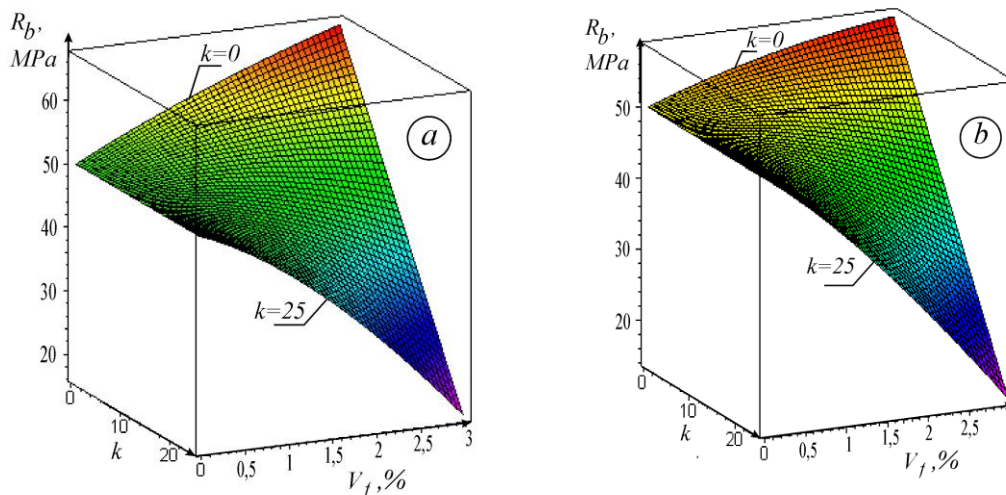
де K_{IC}^0 – тріщиностійкість матеріалу без мікротріщин; f_s – параметр інтенсивності мікророзтріскування (функція деградації матеріалу).

Оскільки в умовах стиску композиту мікророзтріскування пов'язане в основному з присутністю армуючої фібри, то припускаємо, що f_s є лінійною функцією від об'ємного вмісту фібри $f_s(V_f) = kV_f$, де k – коефіцієнт пропорційності.

На основі співвідношень (3) – (5) отримуємо залежність для розрахунку міцності композиту на стиск

$$R_b = (1 - kV_f) \sqrt{\frac{\pi(1 + \lambda_c)^7}{4r((1 + \lambda_c)^2 - 1)(1 - \nu^2)}} \cdot \sqrt{0,33\sigma_f V_f \left(1 - \frac{r\sigma_f}{l\sigma_m}\right) + \sigma_m(1 - V_f)} \times \\ \times \sqrt{E_m \left(1 + \frac{V_f}{(m/(m-1)) - V_f^{1/3}}\right) \rho(\exp \varepsilon_c - 1)}. \quad (6)$$

На рис. 6 на основі наведеної формули побудовані графічні залежності прогнозованої міцності композиту від об'ємного вмісту базальтової, поліпропіленової, вуглецевої, азбестової фібри за різних значень параметра пошкодженості матеріалу за стиску.



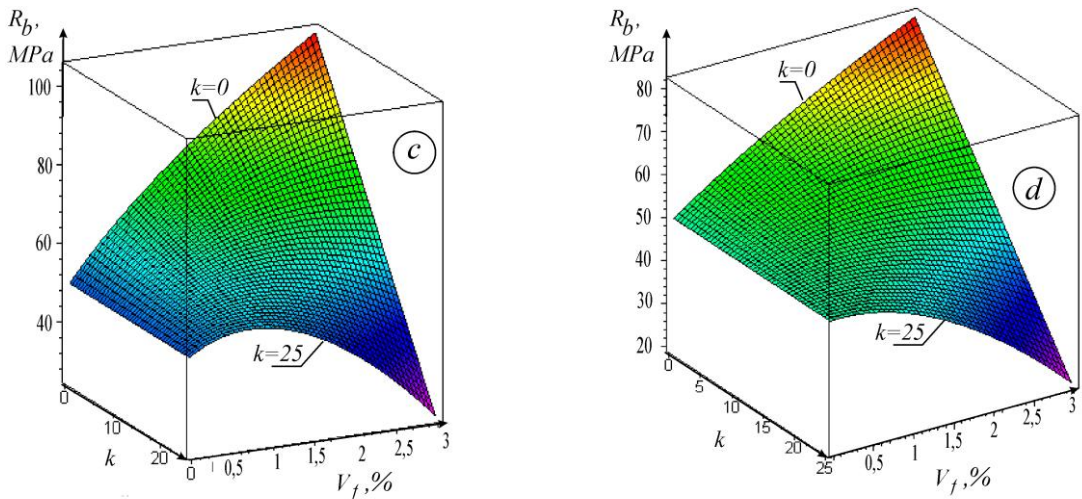


Рис. 6. Теоретичний прогноз міцності за стиску цементного камню армованого базальтовою (а), поліпропіленовою (б), вуглецевою фіброю (с), азбестовою фіброю (д).

Експериментальні дослідження. Для порівняння отриманих теоретичних розрахункових залежностей з експериментальними даними проведено дослідження на стиск цементного каменю армованого базальтовими волокнами. Для приготування розчину використовували портландцемент ПЦ П/А-3-500 загально-будівельного призначення ПАТ "Волинь-Цемент", гіперпластифікатор на основі полікарбоксилату Verament ТВ-1. В усіх серіях зразків водоцементне відношення становило 0,32. Як армуючі елементи в розчин додавали базальтову фібру виробництва ТОВ "Технобазальт-Інвест" діаметром 15 μm , довжиною 12 мм.

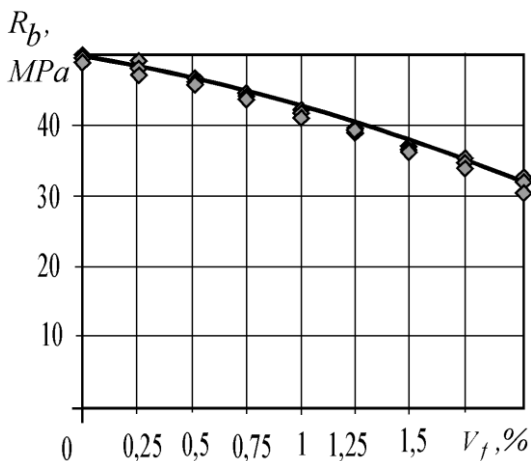


Рис. 7. Залежність міцності армованого цементного каменю при стиску від об'ємного вмісту базальтової фібри.

Вміст фібри у відношенні до цементу змінювали від 0 до 2% за об'ємом. З розчинів виготовляли кубічні зразки розміром 4x4 см, які формували протягом 30 с на віброплощині з подальшою витримкою в повітряно-сухих умовах лабораторії при температурі $25 \pm 3^\circ\text{C}$ протягом 28 діб.

При армуванні матеріалу 2% фібри міцність на стиск становить лише 65% від неармованого цементного каменю. Результати експерименту та прогнозу міцності добре корелюють між собою.

На рис. 7 наведені дані експериментальних досліджень зі встановлення впливу армування базальтовими волокнами цементного каменю на міцність при стиску. Теоретичному прогнозу міцності композиту, розрахованому за формулою (6) відповідає суцільна лінія на графіку. Параметр пошкодженості цементного каменю в даному випадку $k=16,7$. З результатів слідує, що присутність досліджуваних волокон в цементній матриці знижує міцність на стиск композитного матеріалу на основі цементної матриці, армованої волокнами різної природи. Основними чинниками, що впливають на міцність таких матеріалів є пори, як основні ініціатори тріщиноутворення за стиску, а також множинна пошкодженість матеріалу внаслідок порушення адгезійних зв'язків між цементною матрицею та волокнами наповнювача за інтенсивних зусиль стиску. Останній фактор можна вважати причиною зниження міцності на стиск композиту зі збільшенням вмісту високомодульних волокон, що часто спостерігається в експериментальній практиці. Ще одним із факторів, що викликає це явище, можна вважати збільшення вмісту пор в процесі внесення мікрОВОЛОКОН в розчин.

Список використаних джерел:

1. Naaman, A. E. 2007. "Tensile Strain Hardening FRC Composites: Historical Evolution Since the 1960s." In *Advances in Construction Materials*, ed. C. U. Grosse, 181–202. Berlin, Germany: Springer.
2. Banthia, N., M. Azzabi, and M. Pigeon. 1993. "Restrained Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Cementitious Composites." *Materials and Structures* 26 (161): 405–413.
3. Marar, K., Ö. Eren, and T. Çelik. 2001. "Relationship between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High Strength Fiber Reinforced Concrete." *Materials Letters* 47 (4–5): 297–304.
4. Nataraja, M. C., T. S. Nagaraj, and S. B. Basavaraja. 2005. "Reproportioning of Steel Fiber Reinforced Concrete Mixes and their Impact Resistance." *Cement and Concrete Research* 35 (12): 2350–2359.
5. Xu, Z., H. Hao, and H. N. Li. 2012. "Experimental Study of Dynamic Compressive Properties of Fiber Reinforced Concrete Material with Different Fibers." *Materials and Design* 33 (1): 42–55.
6. Kronlof, A., L. Markku, and S. Pekka. 1995. "Experimental Study on the Basic Phenomena of Shrinkage and Cracking of Fresh Mortar." *Cement and Concrete Research* 25 (8): 1747–1754.
7. Brandt A. M. *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance II* Spon Press redition. – 2009, March, 544 p.
8. Jefferey M. and Lemm HB *Tiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and applications (Building Materials Science)*// William Andrew. – 1990. – 194 p.
9. Maidl B. *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Wiley – VCH. – 1995. – 292 p.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции. М.:АСВ, 2004, 560с.
11. Hannant Dj, *Fibre-reinforced concrete, Advanced Concrete Technology – Processes*, Elsevier, Oxford. UK, 2002.
12. K. Ramujel. Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Int. J. of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2013, V. 2, 8, p. 3409-3413.
13. Солодкий, С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементях/ С. Й. Солодкий. – Л.: НУ "ЛПТ", 2008. – 144 с.
14. Силованюк В.П. Розрахункова модель фібробетону на міцність за розтягу/ В.П. Силованюк, Р.Я. Юхим, А.Є. Ліснічук, Н.А. Івантишин// Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 39–45. (V. P. Sylovanyuk, R. Ya. Yukhym, A. E. Lisnichuk, and N. A. Ivantyshyn. Computational model of the tensile strength of fiber-reinforced concrete// *Materials Science*. – 2015. – Volume 51, Issue 3. – P. 340-347.)
15. Силованюк В. П. Прогнозування тріщиностійкості цементного каменю та фібробетону/ Силованюк В. П., Юхим Р. Я., Івантишин Н. А., Ліснічук А. Є. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – Т. 54, № 4. – С. 120–125.
16. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982, 196 с.
17. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. –М.: Наука, 1966, 707с.
18. Evans A.G. and Fu Y. Some effects of microcracks on the mechanical properties of brittle solids – II microcrack toughening. – *Acta metal.* Vol.33, No. 8, pp.1525–1531, 1985.

Рецензент: Д-р техн. наук, професор,
 зав. відділу конструкційної міцності матеріалів
 у робочих середовищах
 ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ

Я.Л. Іваницький

Стаття надійшла до редакції 21.04.2016.