

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ, АРМОВАНИХ ПОЛІПРОПІЛЕНОВОЮ ФІБРОЮ. ЧАСТИНА II

© Солодкий С. Й., Турба Ю. В., 2015

Одним із перспективних конструкційних матеріалів, що дає змогу компенсувати такі недоліки бетону, як низька міцність під час розтягування та висока крихкість руйнування, є дисперсно армовані бетони – фібробетони. Наявність армуючих волокон у бетоні за умови їх оптимального вмісту підвищує щільність, однорідність та зменшує ризики тріщиноутворення, що дає можливість прогнозувати вищу витривалість, динамічну стійкість, стираний, морозостійкість і довговічність цементного бетону загалом. У цій статті подано результати реалізації трифакторного трирівневого експерименту для цементних бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю, з обраними технологічними чинниками впливу (витратою фібри; відношенням довжини фібри до розміру максимального крупного заповнювача; коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача), статистичний аналіз та оптимізація результатів дослідження. Зроблено висновки, за яких умов досліджувані характеристики бетону армованого поліпропіленовою фіброю досягають максимального значення за відповідних співвідношень обраних технологічних чинників.

Ключові слова: дисперсно армований бетон, фібробетон, фібра, тріщиностійкість, технологічні чинники впливу, витрата фібри, відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача, коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача, міцнісні та енергетичні характеристики тріщиностійкості.

One of prospective construction materials, which allow compensating such concrete lack as low tensile strength and high destruction fragility, is continuously reinforced concrete – fibrous concrete. Presence of reinforcing fibres in concrete provided that their content is optimal is densifying, raising homogeneity and reducing the risk of cracking, which allows to project higher endurance, dynamic stability, abrasion, frost-resistance and cement concrete life on the whole. In this article scientifically proved the implementation results of three-factor and three-level experiment for cement concrete reinforced with polypropylene fiber with the selected technological factors of influence (fiber consumption; the ratio of fiber length to the maximum size of coarse aggregate; the coefficient of grains sliding of coarse aggregate), statistical analysis and optimization of the research results. Done conclusions when researched characteristics of concrete reinforced with polypropylene fiber reach the maximum value at the respective ratios of selected technological factors.

Key words: continuously reinforced concrete, fibrous concrete, fiber, crack resistance, technological factors of influence, fiber consumption, the ratio of fiber length to the maximum size of coarse aggregate, the coefficient of grains sliding of coarse aggregate, strength and power characteristics of crack resistance.

У роботі [1] подано матрицю планування та результати реалізації трифакторного трирівневого експерименту для цементних бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. Статистичний аналіз та оптимізація результатів дослідження наводять у цій статті.

У результаті статистичного опрацювання експериментальних даних стала можлива побудова математичної моделі досліджуваних характеристик у вигляді повних квадратичних поліномів.

Отримані рівняння регресії 2-го порядку (табл. 1), які пов'язують критерії оптимізації Y_1 – міцність на стиск R_b , Y_2 – міцність на розтяг за згину R_{fb} , Y_3 – питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_i , Y_4 – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_l , Y_5 – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_f з обраними технологічними чинниками впливу: X_1 – витратою фібри Q_f (в кг на 1 м³ бетонної суміші); X_2 – відношенням довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача, l_f/d_{max} ; X_3 – коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача $k_{роз}$.

Таблиця 1

Коефіцієнти рівнянь регресії

Функції відгуку Y	Коефіцієнти рівнянь регресії									
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
R_b	43,22	1,71	-3,69	0,91	1,81	2,71	0,01	-1,96	1,51	4,24
R_{fb}	9,14	0,12	-0,55	-0,02	0,32	-0,12	0,37	-0,53	0,49	0,35
G_i	229,20	3,82	-14,39	2,54	-24,64	-8,65	-29,25	-11,47	5,39	-6,00
G_l	438,8	29,8	-77,7	-6,00	50,48	13,98	35,48	-50,50	52,50	49,50
G_f	595,08	37,74	-80,46	-1,83	34,46	13,69	22,68	-55,85	52,42	44,66

Примітка. Виділеними є значущі коефіцієнти за критерієм Стюдента.

Статистичний аналіз рівнянь регресії засвідчив їх адекватність за 90 % довіреної ймовірності. Ці рівняння можна вважати математичними моделями досліджуваних характеристик у вибраному факторному просторі (за F-критерієм Фішера $F_T > F_P$ – табл. 2).

Таблиця 2

Адекватність рівнянь регресії

Функції відгуку Y		R_b	R_{fb}	G_i	G_l	G_f
Критерій Фішера	F_T	3,93	3,72	4,06	3,72	4,28
	F_P	3,89	1,60	2,88	1,14	4,01

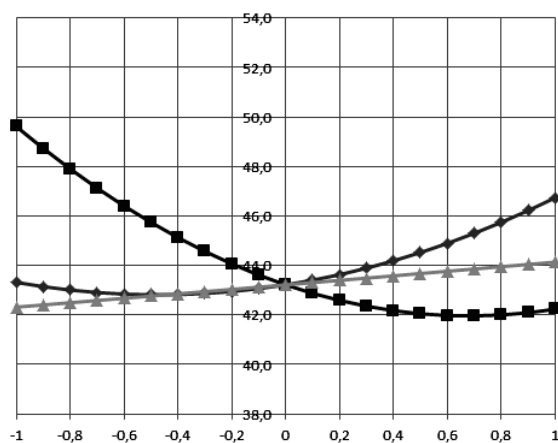
На рис. 1 (а–д) наведені залежності досліджуваних міцнісних характеристик, енергетичних характеристик тріщиностійкості фібробетонів за зміни одного з трьох технологічних чинників (інші два знаходяться на середньому рівні), на основі отриманих рівнянь регресії.

Показники міцності

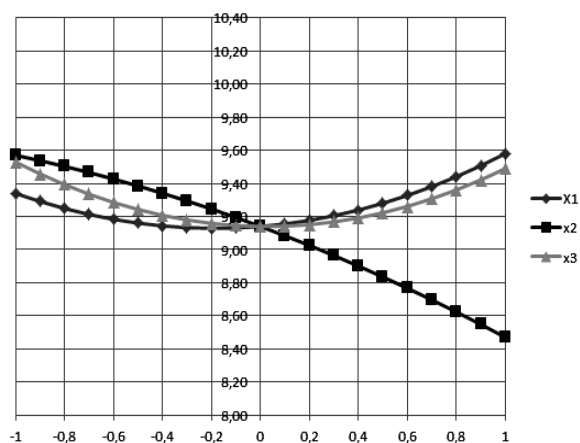
Витрата фібри та коефіцієнт розсуву практично не впливають на характеристики міцності фібробетону (рис. 1, а, б), на відміну від розміру крупного заповнювача. Максимальні міцність на стиск (49,6 МПа) та на розтяг при згині (9,57 МПа) досягаються за використання щебеню розміром 30 мм. Зі зменшенням розміру щебеню з 30 до 15 мм спостерігається спад міцності: R_b – на 15 %; R_{fb} – на 11 %. Однак треба зауважити, що міцність на розтяг у разі згину визначали розрахунком на основі діаграми за значеннями ординати точки зламу (формула В.2 [2]) під час рівноважних механічних випробувань за триточковим згином.

Енергетичні характеристики тріщиностійкості

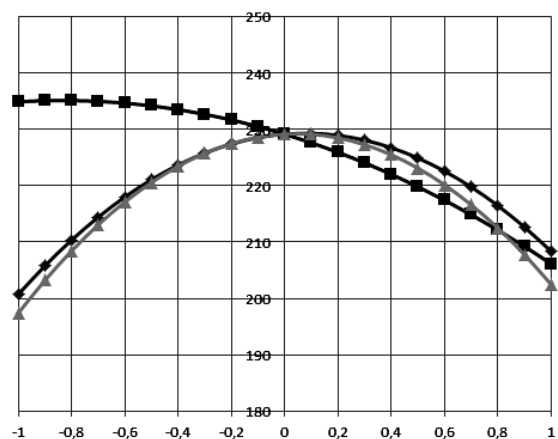
Ефективність роботи бетону в докритичній стадії оцінюється питомими енерговитратами на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини. Залежність показника G_i від витрати фібри та коефіцієнта розсуву має параболічний вигляд. Екстремуми спостерігаються (229 Дж/м²), коли ці чинники знаходяться на середньому рівні. Спад відбувається за максимальних і мінімальних значень Q_f та $k_{роз}$. Бетони, макроструктура яких складається з крупних заповнювачів розміром 30 і 20 мм, працюють краще до моменту зрушення макротріщини, на відміну від дрібнозернистих бетонів.



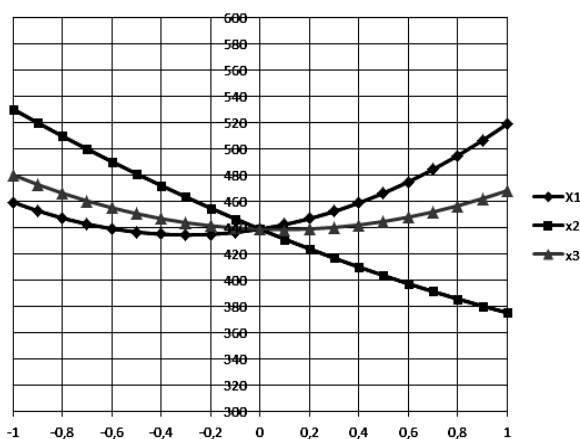
a



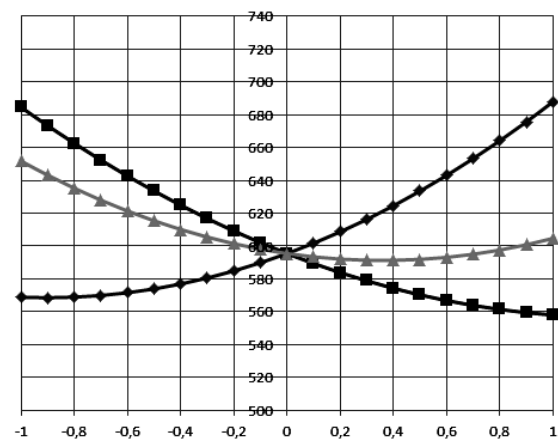
б



в



г



д

Рис. 1. Залежність досліджуваних міцнісних характеристик, енергетичних характеристик тріщиностійкості фібробетонів від обраних технологічних чинників:

a – міцність на стиск R_b , МПа;

б – міцність на розтяг за згину R_{tb} , МПа;

в – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_1 , Дж/м²;

г – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_2 , Дж/м²;

д – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_r , Дж/м²

Ефективність у закритичній стадії деформування визначається питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини. Ефект дисперсного армування проявляється, коли вміст фібри перевищує 7 кг і досягає максимуму за 10 кг – 519 Дж/м². Залежність G_1 від розміру крупного заповнювача має практично лінійну залежність – відбувається падіння на 29 % із 30 мм до 15 мм. Вплив коефіцієнта розсуву незначний.

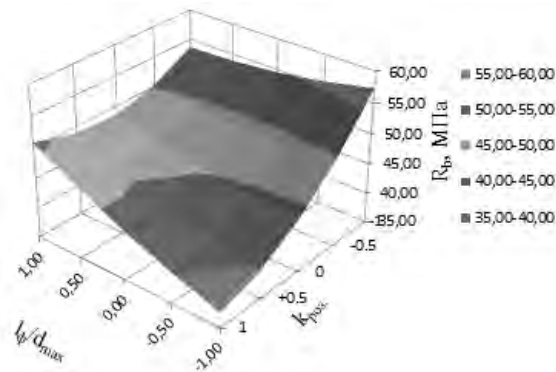
Загальна роботу бетону характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, які зростають із збільшенням витрати фібри та розміру крупного заповнювача. Зростання коефіцієнта розсуву призводить до падіння показника G_r .

Поверхні відгуку

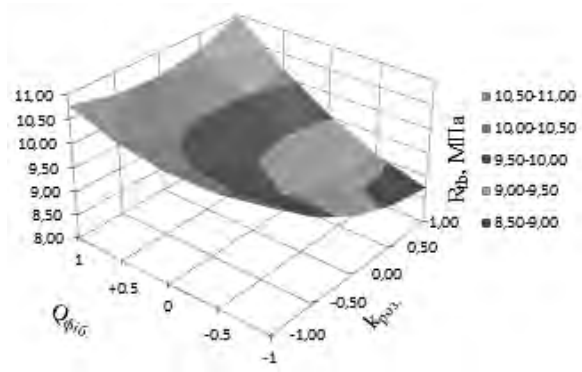
Опис функціональної залежності досліджуваних характеристик бетону армованого поліпропіленовою фіброю від обраних факторів доцільно проілюструвати поверхнями відгуку (рис. 2). Аналіз поверхонь відгуків дає змогу визначити області значень технологічних чинників, які забезпечують максимальні значення критеріїв оптимізації в галузі варіації чинників. Побудова поверхонь відгуку здійснювалась з використанням алгоритму табуляції функцій на заданій двовимірній сітці факторних значень.

На рис. 2 зображено поверхні відгуку, коли досліджувані характеристики бетону армованого поліпропіленовою фіброю досягають максимального значення за відповідних співвідношень обраних технологічних чинників.

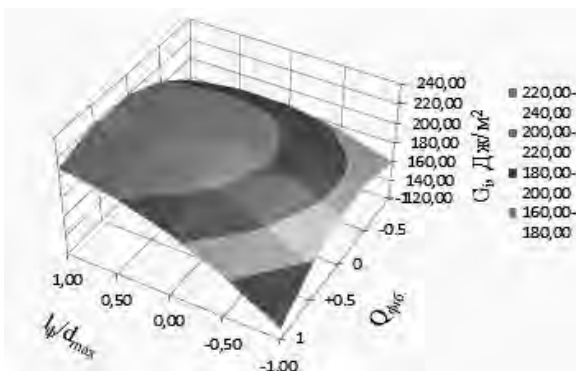
Міцність на стиск максимальна в бетонах, армованих фіброю за максимального вмісту (10 кг фібри на 1 м³ бетонної суміші), в поєднанні з мінімальним коефіцієнтом розсуву і максимальним діаметром крупного заповнювача 30 мм – 57,3 МПа.



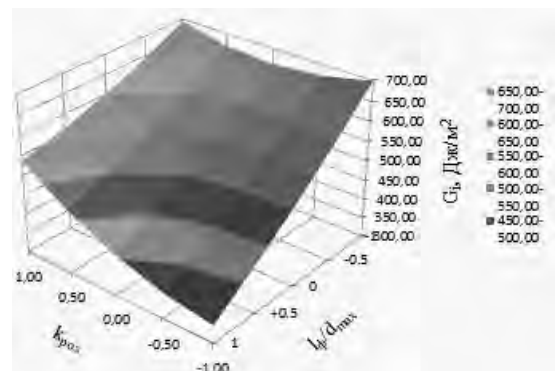
а



б

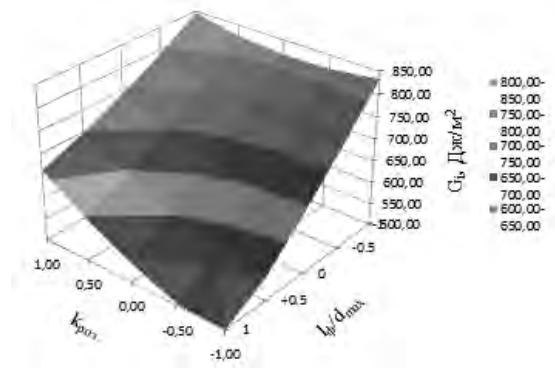


в



г

Рис. 2. Поверхні відгуку досліджуваних міцнісних характеристик, енергетичних характеристик тріщиностійкості фібробетонів за одного незмінного та зміни двох інших технологічних чинників:
а – міцність на стиск R_b , за витрати фібри 10 кг/м³;
б – міцність на розтяг за згину R_t , за відношення довжини фібри до максимального діаметра крупного заповнювача 1,5; в – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_v , за коефіцієнта розсуву 1,1; г – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_t , за витрати фібри 10 кг/м³; д – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_r , за витрати фібри 10 кг/м³



д

Максимум міцності на розтяг у разі згину досягається за максимального розміру крупного заповнювача, максимальному дисперсному армуванню та коефіцієнті розсуву на мінімальному і максимальному рівні ($>10,50$ МПа). А за діаметра крупного заповнювача 20 мм максимуми значень R_{ch} досягають за поєднання максимальної витрати фібри та мінімального коефіцієнта розсуву.

Поверхня відгуку питомих енерговитрати на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини має куполоподібний вигляд з максимальним значенням 221 Дж/м^2 , яке забезпечується поєднанням коефіцієнта розсуву 1,1, витрати фібри $8,5 \text{ кг/м}^3$ та розміру крупного заповнювача 15 мм.

Питомі ефективні енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини та на статичне руйнування досягають своїх максимумів за максимального армування фіброю в поєднанні з використанням максимально діаметра крупного заповнювача 30 мм і не залежить від коефіцієнта розсуву.

Висновки

1. Дослідженнями встановлено, що вплив дисперсного армування поліпропіленовою фіброю на міцнісні характеристики бетону є малоефективний. Проте спостерігається зростання міцності на стиск і на розтяг при згині за максимальної витрати фібри 10 кг в поєднанні з крупним заповнювачем розміром 30 мм і мінімальним коефіцієнтом розсуву: для R_b на 34 %, для R_{ch} – на 21 %.

2. На докритичній стадії деформування позитивний вплив фібри спостерігається тільки за її витрати 7 кг. Подальше армування недоцільне, тому що питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини спадають до мінімальних значень – на 41 %.

3. Найбільший ефект дисперсного армування спостерігається в закритичній стадії руйнування: бетон із сформованою макротріщиною чинить слабкий опір руйнуванню і саме тоді включаються в роботу фіброві волокна. Максимальний їхній вміст підвищує питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини на 51 %.

4. Загальна тріщиностійкість фібробетону, що характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, зростає з підвищенням вмісту фібри в межах з 7–10 кг – на 44 %.

5. Підвищення розміру крупного заповнювача покращує міцнісні та енергетичні характеристики тріщиностійкості фібробетонів, максимальні значення яких досягаються за розміру щебеню 30 мм.

6. Вплив коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача на підвищення міцнісних та енергетичних характеристик тріщиностійкості є незначним. Позитивний ефект проявляється у певному співвідношенні коефіцієнта розсуву з великим заповнювачем: мінімальний коефіцієнт розсуву зі щебенем крупністю 15 мм; максимальний коефіцієнт розсуву зі щебенем крупністю 30 мм.

1. Солодкий С. Й. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю / С. Й. Солодкий, Ю. В. Турба // Наукові нотатки : міжвуз. зб. (за галузями знань “Машинобудування та металообробка”, “Інженерна механіка”, “Металургія та матеріалознавство”). – 2014. – Вип. 46. – С. 512–515. 2. ДСТУ Б В.2.7-227:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення характеристик тріщиностійкості (в’язкості руйнування) при статичному навантаженні. – К. : Мінрегіонбуд України. – 2010.

Цей документ виготовлений за фінансової підтримки Європейського Союзу, в межах Програми транскордонного співробітництва Польща–Білорусь–Україна 2007–2013. Відповідає за суть цієї публікації винятково Національний університет “Львівська політехніка” і він не відображає позицій Європейського Союзу.