



Дворкін Л. Й.



Ковальчук Т. В.

Дворкін Л. Й., доктор технічних наук, професор;  
e-mail: dvorkin-oleg@mail.ru, +38(0362) 63-47-07

Ковальчук Т. В., аспірант

e-mail: koval1225@gmail.com, +38(063)965 8248

Національний університет водного господарства та природокористування

L. Dvorkin, Doctor of techn science, Professor;

T. Kovalchuk, Post-graduate student

National University of Water Management and Natural Resources

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

### ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

#### OPTIMIZATION OF HIGH-PERFORMANCE STEEL FIBER CONCRETE

**Анотація.** В статті розглянуто комплекс технологічних рішень, що направлені на отримання високоміцного сталевібробетону: вибір виду фібри, орієнтація її при ущільненні під дією магнітного поля, встановлення оптимального вмісту фібри та інших параметрів складу фібробетонної суміші. Поставлені задачі розв'язуються за допомогою експериментально-статистичних моделей, отриманих за допомогою математичного планування експериментів. Для отримання оптимальних параметрів складу фібробетону застосовано метод «крутого сходження». Оптимізація складу суміші дозволяє отримати фібробетон з міцністю на стиск 98 МПа і розтяг при згині 8,9 МПа.

**Ключові слова.** Водонепроникність, коефіцієнт фільтрації, пористість, водоцементне відношення, розрахунок, складу бетону, міцність на стиск.

**Анотация.** В статье рассмотрен комплекс технологических решений, направленных на получение высокопрочного сталефибробетона: выбор вида фибры, ориентация ее при уплотнении под действием магнитного поля, установление оптимального содержания фибры и других параметров состава фибробетонной смеси. Поставленные задачи решаются с помощью экспериментально-статистических моделей, полученных с помощью математического планирования экспериментов. Для получения оптимальных параметров состава фибробетона применен метод «крутого восхождения». Оптимизация состава смеси позволяет получить фибробетон с прочностью на сжатие 98 МПа и растяжение при изгибе 8,9 МПа.

**Ключевые слова.** Водонепроницаемость, коэффициент фильтрации, пористость, водоцементное отношение, расчет, составы бетона, прочность при сжатии.

**Annotation.** The article presents the results of research carried out with the use of mathematical Experiment planning to determine the effect on fiber-reinforced concrete tensile strength in bending fiber type, the effect of its orientation in the magnetic field and the composition of fiber-reinforced concrete mixture.

To select the type of fiber that allows to obtain concrete with the highest strength characteristics, have been implemented two types of statistical plans  $2^{3-1}$ . Among the varied factors was the kind of fiber. As initial components were used Portland cement with compressive strength 50 МПа, quartz sand with fineness modulus 2.1, granite crushed stone 5-20 mm, fiber consumption was 40 kg / m<sup>3</sup>. In the concrete mixtures was added polycarboxylate superplasticizer. The ratio of sand and crushed stone is calculated according to known guidelines. As a result of the statistical analysis models it was justified the use in further studies of a wave-like cross-section fibers. Research has shown a positive impact on physical and mechanical properties of fibrous concrete, steel fiber orientation perpendicular to work load at fiber vibration compaction in a magnetic field. The positive effect of fiber orientation increase with increasing slump of the concrete mix.

To determine the optimal content of fiber in the concrete mix three-level three-factor statistical plan «steep climb» was used. Experimental and statistical models allow to calculate the strength of concrete parameters in age 3; 7 and 28 days. Analysis of models yielded a comparative assessment of the impact on the concrete tensile strength of steel fiber consumption, water-cement ratio and the cement content in the concrete mix and to propose composition of the high strength concrete

**Keywords.** Water impermeability, filtration coefficient, porosity, water-cement ratio, design, concrete compositions, compressive strength.

**Постановка проблеми.** В сучасному будівництві все ширше застосовують фібробетон, для якого характерні підвищені значення міцності на розтяг, ударо- та вібростійкості, низька стиратність та ряд інших покращених фізико-механічних властивостей.

На даний час запропонована велика кількість видів сталевібробетону, які відрізняються геометричними параметрами та властивостями металу, з якого вони виготовлені [1]. Найпоширенішими в Україні є три види фібри із низьковуглецевої сталі: хвилеподібна, із загнутими та зплющеними кінцями (рис. 1). Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 1 [2].

**Останні дослідження.** З використанням дрітної арматури із низьковуглецевої сталі виконана значна кількість досліджень структури та властивостей фібробетону [1, 5, 11]. Встановлено, що дрітjana фібра із низьковуглецевої сталі є найбільш доцільною з позицій забезпечення високої міцності і деформативності фібробетону.

У дослідженнях, виконаних в Американському інституті бетону відзначається, що сприятлива орієнтація фібри позитивно впливає на міцність при згині сталевібробетону [6]. Вплив магнітного поля на орієнтацію фібри в бетоні докладно розглянуто в роботі Матуса Є.П. [9, 10].

Порівняльний аналіз літературних даних показує, що приріст міцності сталевібробетону на стиск коливається в межах 10...50 % [1, 7, 8]. При цьому міцність на стиск сталевібробетону більшою мірою ніж інші показники залежать від характеристик бетонної матриці. Приріст міцності на розтяг при згині і міцності вихідного матеріалу в більшості досліджень досягають 150...200 %. Міцність на розтяг при розколюванні змінюється за літературними даними [5, 7, 8] на 60...140 %.

Виконані дослідження по фібробетону, не дивлячись на їх різноманіття, більшою мірою стосувались питань особливостей

їх застосування в конструкціях і меншою мірою оптимізацій технологічних параметрів їх виготовлення.

**Мета роботи.** В даній статті розглядаються результати досліджень метою яких було визначити умови досягнення найбільш високих міцнісних показників фібробетону при виборі виду сталевібробетону та її витрати в бетоні на основі аналізу експериментально – статистичних моделей. Аналізується також вплив рухомості бетонної суміші на ефект зміцнення фібробетону при орієнтації сталевібробетону під дією магнітного поля.

**Аналіз.** Найпоширенішими в Україні є три види фібри із низьковуглецевої сталі: хвилеподібна та із загнутими або зплющеними кінцями (рис. 1). Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 1.

Для вибору виду фібри, що дозволяє отримати бетон найбільш високими показниками міцності на розтяг при згині були проведені експерименти із застосуванням математичного планування. Були реалізовані дві напіврепліки типу  $2^{3-1}$ . Умови планування експериментів наведені в табл. 2.

В якості вихідних компонентів бетонної суміші використовували цемент ПЦ-І М500 ВАТ «Волинь-цемент», кварцовий пісок із  $M_{кр}=2,1$ , гранітний щебінь фракції 5...20 мм. Витрата фібри складала 40 кг/м<sup>3</sup>. В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Співвідношення піску і щебеню розраховували згідно відомих рекомендацій [3].

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані поліноміальні моделі виду:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2$$

Коефіцієнти математичних моделей приведені в табл. 3.

Види фібри: основні характеристики (згідно EN 14889-1, ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015:2007)

Основні показники	Вид фібри		
	Хвилеподібна Ф1 60/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф2 60/1	Анкерна із зплющеними кінцями Ф3 50/1
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	50,0 ± 5,0
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1
$\lambda=L/d$	60	60	50
Тимчасовий опір розриву, МПа	1335	1335	1335
Довжина загнутого/зплющеного кінця, мм	-	5,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1
Висота хвилі/ загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-
Середня густина сталі ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup>	7,86	7,86	7,86

Таблиця 2

Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	X1	Анкерна *	хвилеподібна
Водоцементне відношення	X2	0,35	0,45
Вміст цементу, кг/м <sup>3</sup>	X3	500	600

\*- в першій напіврепліці була застосована анкерна фібра із загнутими кінцями, а в другій –зі зплющеними кінцями.

Таблиця 3

Коефіцієнти математичних моделей з порівнянням видів фібри

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб	4,55/4,48	-1,25/-1,33	-0,1/-0,2	0,1/0,03	0,1/0,03
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб	6,0/5,78	-1,4/-1,63	-0,3/-0,3	0,2/0,18	0,2/0,18
Міцність на стиск у віці 7 діб	62,3/64,3	-2,25/-0,25	-6,8/-3,8	-2,3/0,75	-2,3/0,75
Міцність на стиск у віці 28 діб	77,3/74,8	-3,5/-6	-5,3/-4,3	0,5/1,5	0,5/1,5

\*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної та анкерної фібри із загнутими кінцями; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної та анкерної фібри із зплющеними кінцями

На рис. 2 наведені графіки, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності бетону на розтяг при згині ( $R_{p,z}$ ) і стиску ( $R_{c,t}$ ) у віці 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталевих фібри. З них випливає, що найкращі показники міцності характерні при застосуванні хвилеподібної фібри, що можна пояснити її збільшеною поверхнею зчеплення із цементним каменем. Хвилеподібна фібра Ф1 60/1 прийнята для подальших досліджень фібробетонів.

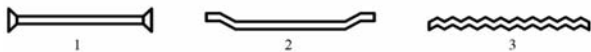


Рис. 1. Фібра із маловуглецевої сталі:

- 1) анкерна із зплющеними кінцями;
- 2) анкерна із загнутими кінцями;
- 3) хвилеподібна

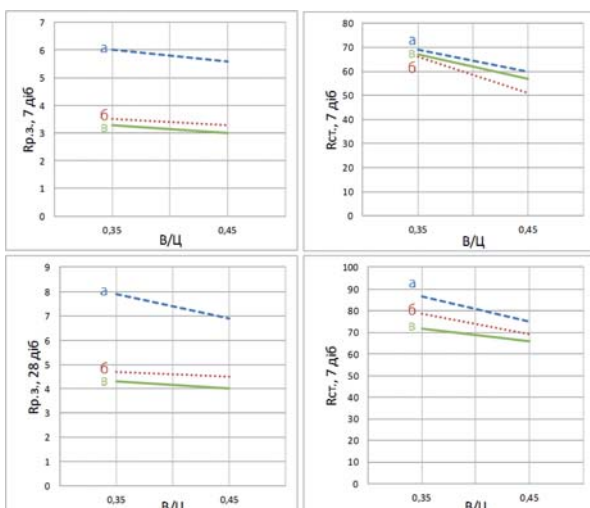


Рис. 2. Розрахункові залежності міцності сталевіфібробетону від В/Ц

- а. Хвилеподібна фібра
- б. Анкерна фібра із загнутими кінцями
- в. Анкерна фібра із зплющеними кінцями

Дослідженнями [4,5,6] встановлено позитивний вплив на фізико-механічні характеристики фібробетону орієнтування сталеві фібри перпендикулярно робочому навантаженню, яке досягається віброуцілюванням фібробетону при дії магнітного поля (рис. 3).

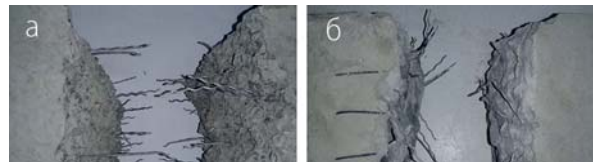


Рис. 3. Вигляд перерізу зруйнованого зразка із орієнтованою (а) та неорієнтованою (б) фіброю

Момент сили, що необхідний для орієнтування фібри в суміші розраховують за формулою:

$$M = \tau_0 \times d \times l^2 / 6,$$

де  $d$  – діаметр фібри,  $l$  – довжина фібри,  $\tau_0$  – граничне напруження зсуву суміші.

Потужність, яка поглинається сталевіфібробетонною сумішшю при вібруванні під дією магнітного поля залежить від циклічної характеристики поля ( $\omega$ ), коефіцієнту армування ( $\mu$ ), середньої густини суміші ( $\rho$ ) та її в'язкості ( $\eta$ ), насиченої намагніченості сталі ( $J$ ):

$$W = \frac{\rho(BJd^2)\mu\omega}{2\pi(\eta)^2}$$

Граничне напруження зсуву ( $\tau_0$ ) і в'язкість суміші ( $\eta$ ) знижуються при збільшенні її рухомості (OK) [4].

Для визначення впливу рухомості бетонної суміші на ефективність орієнтування фібри були проведені досліді, результати яких наведені в табл. 4 та рис. 4. Необхідна рухомість бетонної суміші забезпечувалась підбором вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. Вміст фібри у всіх складах бетонної суміші був постійним і складав 40 кг/м<sup>3</sup>. Орієнтування сталеві фібри відбувалося в результаті дії магнітного поля, яке створювалося електромагнітом встановленим на лабораторному вібромайданчику.

## Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики фібробетону

№	В/Ц	Вміст суперпластифікатора Melflux 2651F, % від маси цементу	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $R_{p,з,7}^7$ , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $R_{p,з,7}^{28}$ , МПа
1	0,30	0,25	7	4,1	5,2
2	0,30	0,35	14	5,2	6,5
3	0,30	0,55	21	6,7	7,9
4	0,30*	0,54	21	3,9	5,3

\*- контрольний склад, який ущільнений без дії магнітного поля

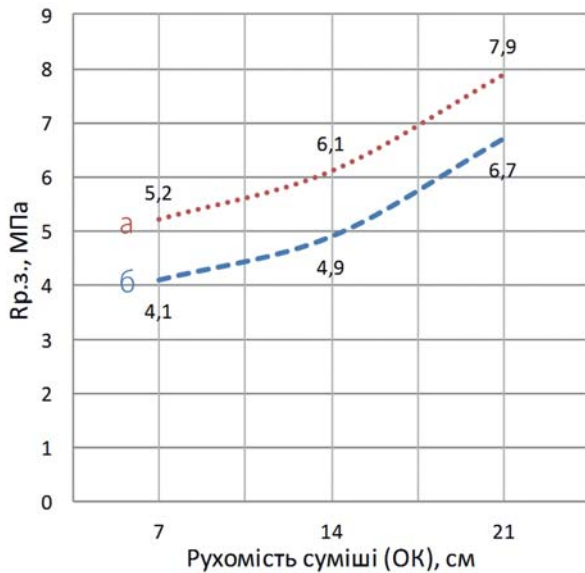


Рис. 4. Розрахункові залежності міцності сталеві фібробетону на розтяг при згині з орієнтованою фіброю від рухомості суміші (ОК)

- а. Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб  
б. Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб

Як слідує із даних табл. 4 застосування бетонної суміші з ОК=7 см ущільненої при дії магнітного поля дало незначний ефект підвищення міцності бетону на розтяг при згині. Підвищення рухомості суміші з 7 до 21 см дало можливість при армуванні фіброю під дією магнітного поля (рис. 3) суттєво покращити ефект орієнтування і збільшити міцність на розтяг при згині в 1,6 рази у віці 7 діб та в 1,5 рази у віці 28 діб.

Для визначення оптимального вмісту фібри в бетонній суміші, що забезпечує найвищі показники міцності бетону на розтяг при згині, був застосований метод «крутого сходження». Зазначений метод визначає стратегію послідовного покровкового проведення експериментів, при якому весь цикл досліджень розбивається на окремі етапи з виходом в область оптимального значення фактора.

На першому етапі був реалізований трирівневий трифакторний, близький до D – оптимального, план (табл. 5) [7]. Статистичний аналіз отриманих результатів експерименту дозволив розрахувати математичні моделі міцнісних параметрів бетону у віці 3, 7 та 28 діб. (табл. 5).

Аналіз моделей підтверджує найбільш суттєве збільшення при дисперсному армуванні міцності на розтяг при згині та дає можливість кількісно оцінити вплив досліджених факторів на міцність фібробетону. З цього аналізу (рис. 5,6) випливає, що найбільший вплив на цей параметр чинить в дослідженому діапазоні вміст фібри та В/Ц. При оцінці впливу кожного з факторів (рис. 5) вміст інших приймали на основному рівні.

Таблиця 4

## Математичні моделі міцнісних параметрів фібробетону

Вихідний параметр	Математичні моделі*	
Міцність на стиск у віці:	3 діб	$y = 35,46 - 0,26X_1 - 7,7 X_2 - 0,14 X_3 + 4,171 X_1^2 + 1,47 X_2^2 + 0,671 X_3^2 - 8,363 X_1X_2 - 0,388 X_1X_3 + 0,213 X_2X_3$
	7 діб	$y = 46,20 - 3,9X_1 - 8,4 X_2 + 0,42 X_3 + 8,618 X_1^2 + 0,418 X_2^2 - 0,682 X_3^2 - 4,850 X_1X_2 - 1,40 X_1X_3 + 0,575 X_2X_3$
	28 діб	$y = 52,81 - 2,88X_1 - 11,09 X_2 + 2,83 X_3 + 11,748 X_1^2 + 2,298 X_2^2 + 0,498 X_3^2 - 6,70 X_1X_2 + 1,80 X_1X_3 - 2,70 X_2X_3$
Міцність на розтяг при згині у віці:	3 діб	$y = 2,74 + 0,1X_1 - 0,22 X_2 + 0,63 X_3 + 0,171 X_1^2 - 0,129 X_2^2 - 0,279 X_3^2 - 0,625 X_1X_2 + 0,275 X_1X_3 + 0,125 X_2X_3$
	7 діб	$y = 3,27 - 0,1X_1 - 0,41 X_2 + 1,15 X_3 + 0,365 X_1^2 - 0,106 X_2^2 - 0,194 X_3^2 - 0,450 X_1X_2 - 0,075 X_1X_3 - 0,225 X_2X_3$
	28 діб	$y = 4,05 - 0,15X_1 - 0,44 X_2 + 1,67 X_3 + 0,532 X_1^2 - 0,282 X_2^2 - 0,368 X_3^2 - 0,388 X_1X_2 - 0,087 X_1X_3 - 0,213 X_2X_3$

\*-  $X_1 = \frac{Ц-500}{50}$ ;  $X_2 = \frac{В/Ц-0,4}{0,05}$ ;  $X_3 = \frac{Ф-20}{20}$ ,

де Ц- витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>; В/Ц – водоцементне відношення; Ф- витрата фібри, кг/м<sup>3</sup>

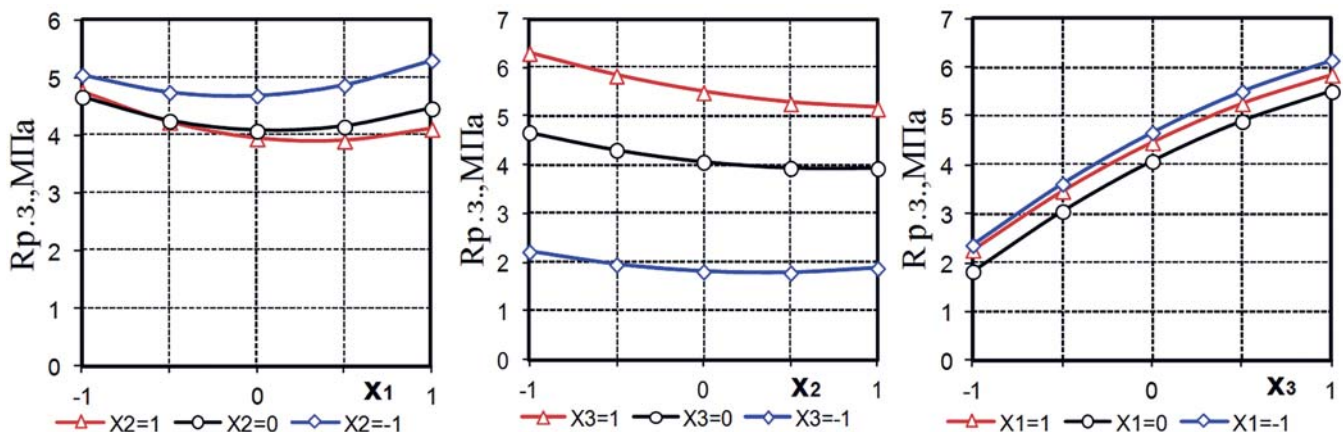


Рис. 5. Вплив витрати цементу ( $X_1$ ), фібри ( $X_3$ ) та В/Ц ( $X_2$ ) на розтяг при згині у віці 28 діб

При крутому сходженні вміст цементу залишили постійним, враховуючи, що в обраному діапазоні при постійних значеннях В/Ц він чинить несуттєвий вплив на міцність, подальше зниження В/Ц нижче 0,268 виявилось також не ефективним у зв'язку із суттєвим погіршенням легковкладальності бетонної суміші. Експериментальні дані, отримані при «крутому сходженні» наведені в табл. 6.

«Круте сходження» при розрахунку оптимальних значень В/Ц та вмісту фібри в бетоні

№	Послідовність операцій крутого сходження	Дослідні фактори				Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
		Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Витрата фібри, кг/м <sup>3</sup>			
1	Основний рівень, Xi0	500	0,4	20			
2	Інтервал варіювання, ΔXi0	50	0,05	20			
3	Верхній рівень	550	0,45	40			
4	Нижній рівень	450	0,35	0			
5	Кодове значення змінних	X1	X2	X3			
6	Досліди:						
	1	+	+	+	5,6	58	
	2	+	+	-	2,2	54	
	3	+	-	+	6,9	86	
	4	+	-	-	3,1	82	
	5	-	+	+	5,8	62	
	6	-	+	-	2,6	69	
	7	-	-	+	6,6	80	
	8	-	-	-	2,2	72	
	9	+	0	0	3,8	60	
	10	-	0	0	5,4	66	
	11	0	+	0	3,8	45	
	12	0	-	0	4,9	60	
	13	0	0	+	5,5	57	
	14	0	0	-	1,9	46	
	15	0	0	0	4,0	55	
	16	0	0	0	4,0	55	
17	0	0	0	4,0	55		
7	bi*		2,83	1,67			
8	biΔXi0		0,142	33,4			
9	λ= μ/b_i; μ=1		0,35	0,599			
10	Крок ≈ λ(biΔXi0)		0,05	0,05			
11	Досліди на лінії сходження						
	№1		0,318	0,318	7,0	94	
	№2		0,268	0,268	8,9	98	
	№3		0,268	0,268	8,6	92	

bi\* - відповідає коефіцієнту моделі (табл. 5), що характеризує вплив відповідного фактору на показники міцності на розтяг при згині

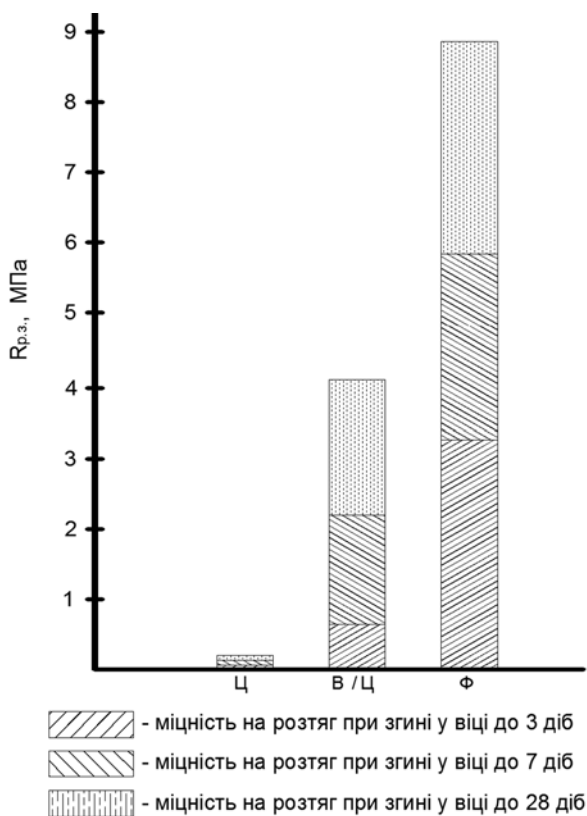


Рис. 6. Діаграма впливу витрат цементу, фібри та В/Ц на міцність фібробетону на розтяг при згині у віці 3, 7 та 28 діб  
Ц – витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>;  
Ф – витрата фібри, кг/м<sup>3</sup>;  
В/Ц – водо-цементне відношення

**Висновок.** За результатами крутого сходження отримано оптимальний склад бетонної суміші (Ц=550 кг/м<sup>3</sup>; Ф=60 кг/м<sup>3</sup>; В/Ц=0,27), що дозволяє збільшити міцність на розтяг при згині до 8,9 МПа, що майже в три рази перевищує міцність не армованого бетону, при цьому міцність на стиск досягає 98 МПа.

#### Література:

1. Кияшко В.Т. Фібра для армування залізобетонних будівельних виробів// Журнал цивільного будівництва. – 2012. – №8 – с.61-66.
2. BS EN 14889-1:2006 – Фібра для бетонів. Стальна фібра. Позначення, специфікація, конфігурація.
3. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства: монографія/ Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – Київ: «Основа», 2007. – 616 с.
4. Матус Є.П. Вплив магнітного поля на структуру і властивості цементно – піщаного сталевібробетону: автореферат дис. на здобуття наукового ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби»/ Є.П. Матус; Новомосковський архітектурно-будівельний університет. – Ново-сibirськ, 2000. – 20 с.
5. Патент Росії № 99113551/03(013855) від 21.06.1999 В28В 1/52.
6. Ключев С.В. Високоміцний фібробетон для промислового та цивільного будівництва // Журнал цивільного будівництва. – 2012. – №8 – с.61-66.
7. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експериментів: навч. посіб./ Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с.