

УДК: 624.012

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНОГО СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВЫСОКОПРОЧНОГО
СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

OPTIMIZATION OF HIGH-STRENGTH FIBER CONCRETE

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, Ковальчук Т.В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Дворкин Л.И., д.т.н., профессор, Ковальчук Т.В., аспирант (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

Dvorkin L.J, doctor of technical sciences., professor, Kovalchuk TV, post-graduate student (National University of Water Management and Natural Resources, Rivne)

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.

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.

In the article the complex technological solutions aimed at obtaining high-strength fiber concrete: choose the type of the fiber, its orientation during compaction under the influence of a magnetic field, the establishment of an optimal fiber content and other parameters of fiber-reinforced concrete mixture composition. The problem is solved with the help of experimental and statistical models derived using mathematical planning of experiments. For optimization fiber reinforced concrete composition, the method of "steep climb" are used. Optimization of the mixture provides a fiber concrete with compressive strength 98 MPa and flexural tensile of 8.9 MPa.

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

На даний час запропонована велика кількість видів сталеві фібри, 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].

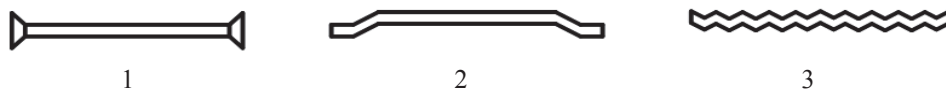


Рис 1. Фібра із маловуглецевої сталі:
1) анкерна із зплющеними кінцями; 2) анкерна із загнутими кінцями; 3) хвилеподібна
Таблиця 1.

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 (ρ), г/см ³	7,86	7,86	7,86

Для вибору виду фібри, що дозволяє отримати бетон з 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.

Таблиця.2

Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	X_1	Анкерна *	хвилеподібна
Водоцементне відношення	X_2	0,35	0,45
Вміст цементу, кг/м^3	X_3	500	600

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

В якості вихідних компонентів бетонної суміші використовували цемент ПЦ-I М500 ВАТ «Волинь-цемент», кварцовий пісок із $M_{кр}=2,1$, гранітний щебінь фракції 5..20 мм. Витрата фібри складала 40 кг/м^3 . 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:

$$y=b_0+ b_1X_1+ b_2X_2+ b_3X_3+ b_{12}X_1X_2$$

Коефіцієнти математичних моделей приведені в табл.3

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	-	-
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 рискою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням хвилеподібної та анкерної фібри із загнутими кінцями; під рискою 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 ($R_{ст.}$) 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 ФІ 60/1 прийнята для подальших досліджень фібробетонів.

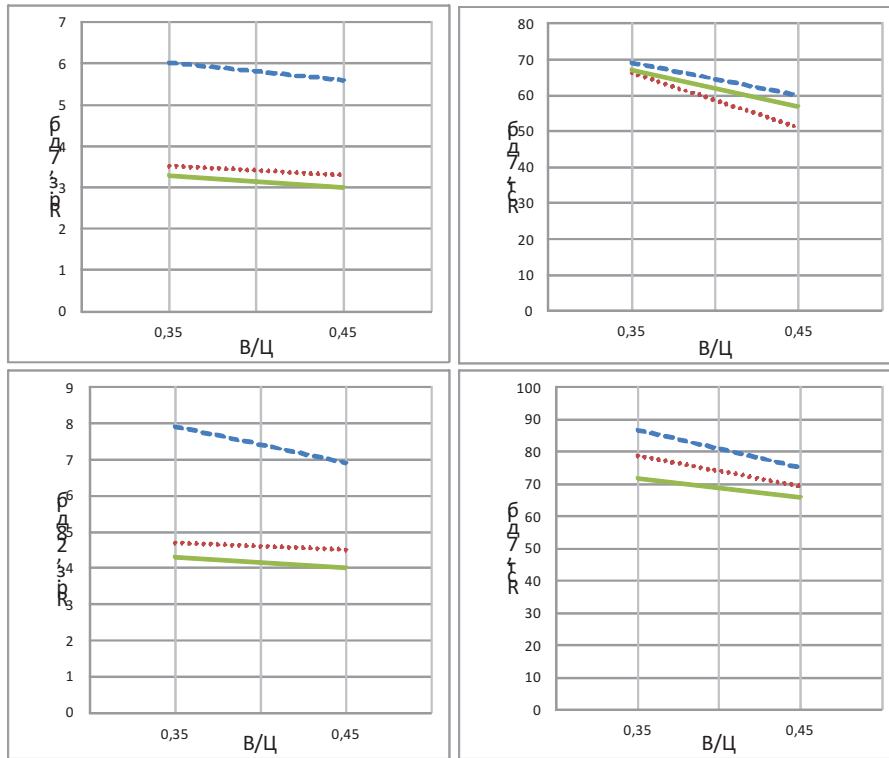


Рис 2. Розрахункові залежності міцності сталеві фібробетону від В/Ц

- Хвилеподібна фібра
- Анкерна фібра із загнутими кінцями
- Анкерна фібра із зплющеними кінцями

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

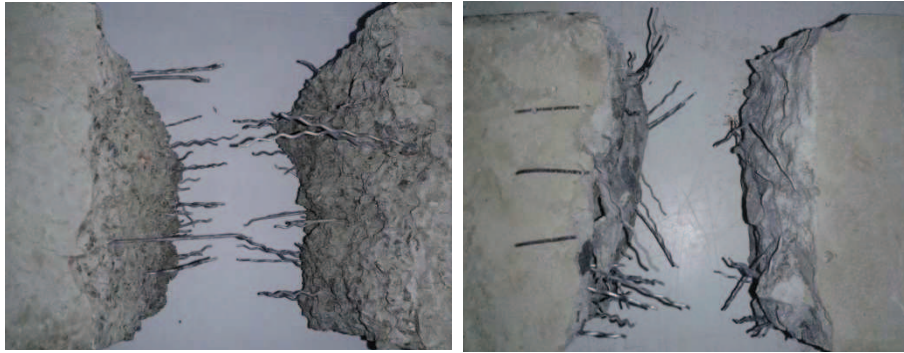


Рис 3. Вигляд перерізу зруйнованого зразка із орієнтованою (а) та не орієнтованою (б) фіброю.

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

$$M = \tau_0 \times d \times l^2 / 6, \quad (1)$$

де d – діаметр фібри, l – довжина фібри, τ_0 – граничне напруження зсуву суміші.

Потужність, яка поглинається сталевібробетонною сумішшю при вібруванні під дією магнітного поля залежить від циклічної характеристики поля (ω), коефіцієнту армування (μ), середньої густини суміші (ρ) та її в'язкості (η), насиченої намагніченості сталі (J):

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

Граничне напруження зсуву (τ_0) і в'язкість суміші (η) знижуються при збільшенні її рухомості (ОК) [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/м³. Орієнтування сталевібробетонної суміші відбувалося в результаті дії магнітного поля, яке створювалося електромагнітом встановленим на лабораторному вібромайданчику.

Таблиця 4.
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 $R_{p.z., 7}$ МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $R_{p.z., 28}$ МПа
1	0,30	0,25	7	4,1	5,2
2	0,30	0,35	14	4,9	6,1
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.

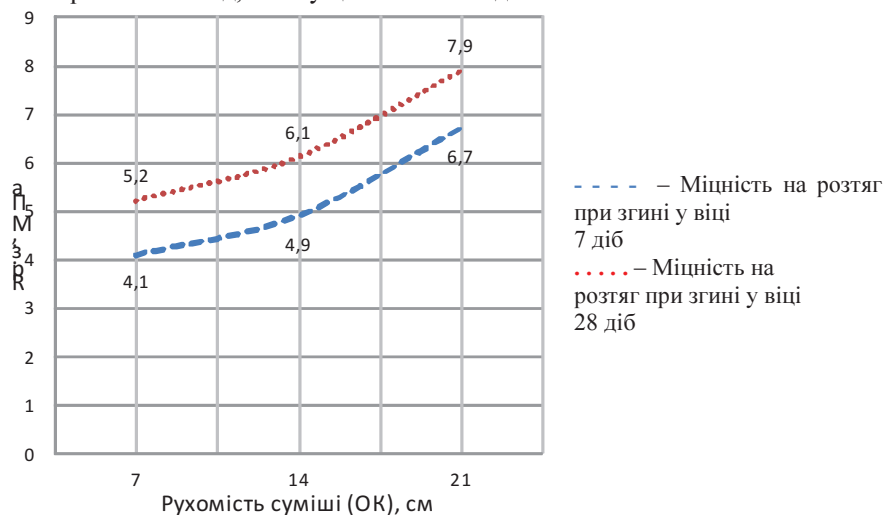


Рис 4. Розрахункові залежності міцності сталеві фібробетону на розтяг при згині з орієнтованою фіброю від рухомості суміші (ОК)

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 покрокового 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 5.

Математичні моделі міцнісних параметрів фібробетону

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

$$* - X_1 = \frac{C-500}{50}, \quad X_2 = \frac{B/C-0,4}{0,05}, \quad X_3 = \frac{F-20}{20},$$

де C- витрата цементу, кг/м³; B/C – водоцементне відношення; F- витрата фібри, кг/м³

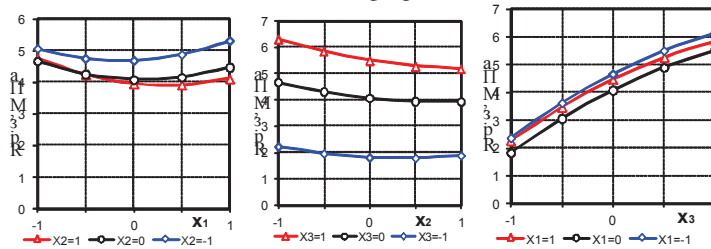
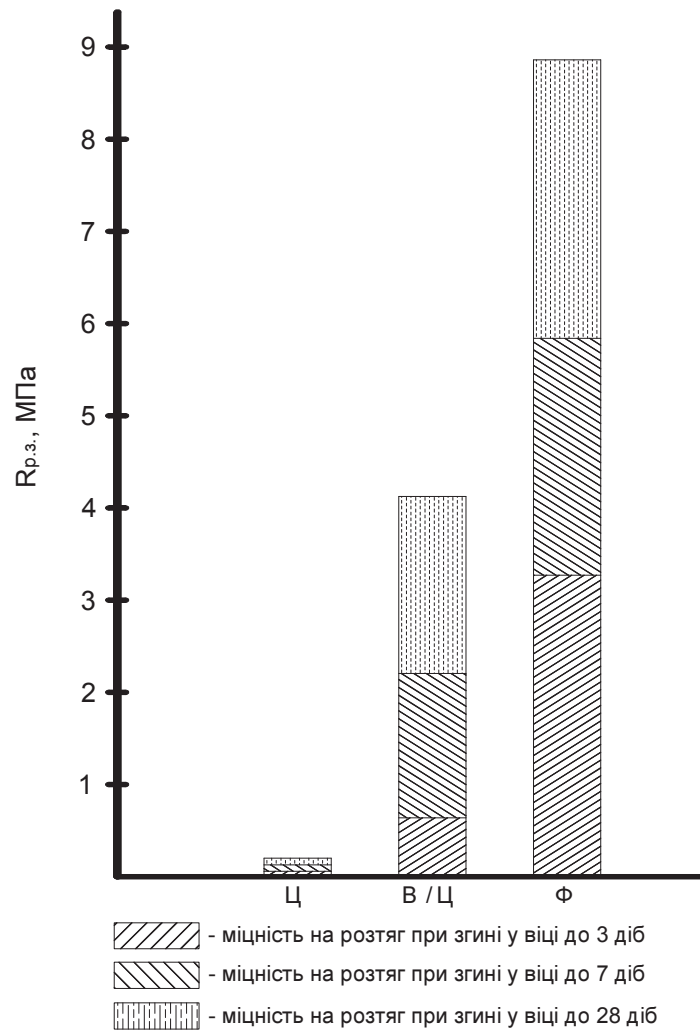


Рис 5. Вплив витрати цементу (X₁), фібри (X₃) та В/Ц (X₂) на розтяг при згині у віці 28 діб



Ц – витрата цементу, $\text{кг}/\text{м}^3$; Ф – витрата фібри, $\text{кг}/\text{м}^3$; В/Ц – водо-цементне відношення
 Рис 6. Діаграма впливу витрат цементу, фібри та В/Ц на міцність фібробетону на розтяг при згині у віці 3,7 та 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.

Таблиця.6

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

№	Послідовність операцій крутого зходження	Дослідні фактори				
		Витрата цементу, кг/м ³	В/Ц	Витрата Фібри, кг/м ³	Міцність на розтяг при згині у віці 28 днів, МПа	Міцність стиск у віці 28 днів, МПа
1	Основний рівень, X_{i0}	500	0,4	20		
2	Інтервал варіювання, ΔX_{i0}	50	0,05	20		
3	Верхній рівень	550	0,45	40		
4	Нижній рівень	450	0,35	0		
5	Кодове значення змінних	X_1	X_2	X_3		
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	b_i^*		2,83	1,67		
8	$b_i \Delta X_{i0}$		0,142	33,4		
9	$\lambda = \frac{\mu}{E_i}; \mu = 1$		0,35	0,599		
10	Крок $\approx \lambda(b_i \Delta X_{i0})$		0,05	20		
11	Досліди на лінії сходження					
	№1		0,318	40	7,0	94
	№2		0,268	60	8,9	98
	№3		0,268	80	8,6	92

b_1^* - відповідає коефіцієнту моделі (табл. 5), що характеризує вплив відповідного фактору на показники міцності на розтяг при згині.

Експериментальні дані, отримані при «крутому сходженні» наведені в табл.6.

За результатами крутого сходження отримано оптимальний склад бетонної суміші ($\text{Ц}=550 \text{ кг/м}^3$; $\text{Ф}=60 \text{ кг/м}^3$; $\text{В/Ц}=0,27$), 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.

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 виробництво»/ Є.П. Матус; Новомосковський архітектурно-будівельний університет. – Новосибірськ, 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.