

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ И СТЕКЛЯННОЙ ФИБРОЙ

Ляшенко Т.В., д.т.н., профессор,
Довгань А.Д., к.т.н., доцент

Одесская государственная академия строительства и архитектуры
frabul16@gmail.com

Аннотация. Отмечается различие в действии разных видов фибры, вводимой в цементную матрицу, на структуру и свойства композитов и целесообразность исследований гибридного армирования. Статья опирается на данные о мелкозернистом бетоне с полипропиленовой и стеклянной фиброй. Построенные по результатам спланированного эксперимента экспериментально-статистические модели 2-го порядка, описывающие влияние дозировки микрокремнезема, фракционного состава песка и содержания фибры двух видов на свойства материала, позволили: выявить отрицательный синергизм более коротких полипропиленовых и стеклянных волокон; исключив из моделей эффекты полимерной фибры, оценить вклад стеклянной фибры и других компонентов в повышение ударостойкости, трещиностойкости и прочности при изгибе (в 7, 3 и 2 раза соответственно).

Ключевые слова: стеклянная фибра, минеральная добавка, экспериментально-статистическая модель, ударостойкость, трещиностойкость, прочность.

МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ З МІКРОКРЕМНЕЗЕМОМ І СКЛЯНОЮ ФІБРОЮ

Ляшенко Т.В., д.т.н., професор,
Довгань О.Д., к.т.н., доцент

Одеська державна академія будівництва та архітектури
frabul16@gmail.com

Анотація. Відзначається відмінність у дії різних видів фібри, що вводиться в цементну матрицю, на структуру та властивості композитів і доцільність досліджень гібридного армування. Стаття опирається на дані про дрібнозернистий бетон з поліпропіленовою та скляною фіброю. Побудовані за результатами спланованого експерименту експериментально-статистичні моделі 2-го порядку, що описують вплив дозування мікрокремнезему, фракційного складу піску і вмісту фібри двох видів на властивості матеріалу, дозволили: виявити негативний синергізм більш коротких поліпропіленових і скляних волокон; виключивши з моделей ефекти полімерної фібри, оцінити внесок скляної фібри та інших компонентів в підвищення ударостійкості, тріщиностійкості та міцності при вигині (у 7, 3 і 2 рази відповідно).

Ключові слова: скляна фібра, мінеральна добавка, експериментально-статистична модель, ударостійкість, тріщиностійкість, міцність.

MECHANICAL PROPERTIES OF FINE GRAINED CONCRETE WITH MICROSILICA AND GLASS FIBRE

Lyashenko T.V., D.Sc., Professor
Dovgan A.D., Ph.D., Associated Professor

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
frabul16@gmail.com

Abstract. The distinction in effects of fibre of different type when embedded in cement matrix and expediency to investigate the possibilities of using the advantages of different fibre working together is noted at first. Previously obtained information on the influence of hybrid "polypropylene + glass" fibre on the properties of cement composite was analysed. Experimental-statistical models built on results of the designed experiment allowed the negative synergism of two fibrous components and the less positive influence of the first one to be revealed. With effects of polypropylene fibre eliminated from the models, they have been used to evaluate the individual and joint contributions of microsilica, 2-fractional sand, and glass fibre in increase of impact resistance, crack resistance, and bending strength (by the factor 7, 3, and 2 respectively). At 2% of glass fibre (by mass) the composition presents the high performance concrete that can be used in thin-wall structures. Therewith water permeability, frost resistance and other properties defining the durability should be additionally studied.

Key words: glass fibre, mineral additive, experimental-statistical model, impact resistance, crack resistance, strength.

Введение. Как известно, вводимая в цементную матрицу фибра разных видов [1], из разных материалов, разных размеров и форм, по-разному влияет на структуру и свойства композитов [1-3]. Одни (относительно короткие, низко модульные волокна) могут препятствовать возникновению и развитию лишь усадочных микротрещин [2]. Другие (высокоупругие длинные волокна) способны удерживать берега макротрещин [3]. С 90-х годов для создания высокофункциональных (*High Performance*) материалов исследуются возможности соединять индивидуальные достоинства разных видов – использовать гибридную фибру («полиармирование»).

В гибридных системах часто применяют наиболее популярную стальную и полипропиленовую фибру. В работе [4] рассмотрены 5 комбинаций стальных и полипропиленовых волокон разной длины и формы. Исследовались бетоны с двумя видами стальной и короткой целлюлозной фибры [5], со стальными и полиолефиновыми волокнами [6], со смесями стальной, полипропиленовой и ПВХ фибры [7] и др.

Влияние системы «полипропиленовая + стеклянная фибра» на прочность и трещиностойкость мелкозернистого бетона (патент Украины № 45587; авторы Вознесенский В.А., Довгань П.М., Довгань А.Д.) было показано в статьях [8-10]. Полученные в этом исследовании ЭС-модели позволили не только выявить существенно меньшее индивидуальное влияние полипропиленовой фибры на механические свойства композита, в сравнении со стеклянной, но и обнаружить отрицательный синергизм (антагонизм) двух волокнистых компонентов.

Рационально спланированный эксперимент, в котором нижним уровням факторов фиброармирования соответствовало отсутствие фибры, дает возможность исключить из

Таблица 1 – Значения варьируемых дозировок компонентов

<i>i</i>	Фактор X_i	Уровни		
		$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Содержание микрокремнезема (<i>MS</i> , массовые части на 100 м.ч. цемента)	0	5	10
2	Доля мелкого песка (со средним диаметром $d=0.27$ мм) в смеси с крупным ($d=0.38$ мм) (<i>SG – Sand Granulometry</i> , м.ч. на 100 м.ч. песка)	25	50	75
3	Количество полипропиленовой фибры (<i>PF</i> , 12 мм, м.ч. на 100 м.ч. растворной смеси)	0	0.5	1.0
4	Количество щелочестойкого стекловолокна (<i>GF</i> , 30 мм, м.ч. на 100 м.ч. растворной смеси)	0	1	2

моделей эффекты, связанные с введением полипропиленовых волокон, и проанализировать свойства более простой (в том числе с технологической точки зрения) рецептурной системы.

Эксперимент и ЭС-модели. Варьировавшиеся в эксперименте 4 рецептурных фактора X_i ($i = 1 \dots 4$), нормализуемые к $-1 \leq x_i \leq +1$, представлены в таблице 1. В матрицу на ПЦ П/А-Ш-500 вводился суперпластификатор Дунамон SP3 (1.0 % от массы цемента); цементно-песчаное отношение 1:1 (по массе).

По значениям свойств для 18 составов (в соответствии с планом эксперимента), были построены адекватные 4-факторные ЭС-модели 2-го порядка (со значимыми коэффициентами). Подстановка в эти модели $x_3 = -1$ позволила получить описания вида (1) для свойств (Y) 3-факторной системы. В таблице 2 приведены оценки коэффициентов b для цементно-водного отношения, плотности, прочности при изгибе и сжатии, критического коэффициента интенсивности напряжений, ударостойкости (Дж) и динамического модуля упругости фибробетона.

$$Y(x_1, x_2, x_4 / x_3 = -1) = b_0 + \sum_{i=1,2,4} b_i x_i + \sum_{i=1,2,4} b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1,2 < j} b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Таблица 2 – Коэффициенты ЭС-моделей свойств стеклофибробетона

	C/B	ρ кг/м ³	R_b МПа	R_c МПа	K_{1c} МПа·м ^{0.5}	$\ln T$	E ГПа
b_0	3.45	2355.6	16.65	115.94	0.817	4.49	49.03
b_1	0.0	-44.7	0.28	1.26	0.099	0.10	-2.45
b_2	-0.09	-54.2	1.86	-6.18	0.098	0.27	-2.14
b_4	-0.46	-41.2	2.96	-5.05	0.278	0.49	-2.33
b_{11}	0.0	-19.9	1.07	-3.82	0.186	-0.29	-2.40
b_{22}	0.0	-16.7	-1.44	3.85	0.147	0.14	0.0
b_{44}	0.0	0.0	0.88	3.90	0.0	0.26	0.0
b_{12}	0.07	0.0	0.23	0.0	0.015	-0.14	0.64
b_{14}	0.0	23.9	1.11	-1.01	0.054	0.29	0.33
b_{24}	0.07	0.0	1.15	-1.76	0.027	0.0	0.0

Обсуждение результатов. Модели описывают поля свойств [11-13] армированного стеклянной фиброй бетона в координатах трех рецептурных факторов. В таблице 3 показаны основные обобщающие показатели (G) этих рецептурных полей: минимальный и максимальный уровни поля, абсолютный и относительный перепад, координаты экстремумов (т.е., соответствующие им составы).

Таблица 3 – Обобщающие показатели рецептурных полей 7 свойств

G	Y	C/B	ρ	R_b	R_c	K_{1c}	T	E
Y_{\min}		2.90	2203	12.2	106.4	0.53	42.3	40.7
Y_{\max}		4.14	2483	24.7	133.5	1.72	297.7	54.7
$\Delta = Y_{\max} - Y_{\min}$		1.25	238.7	12.6	25.9	1.19	255.4	14.0
$\delta = Y_{\max} / Y_{\min}$		1.43	1.11	2.04	1.24	3.26	7.0	1.35
x_{\min}	$x_1, x_2,$ x_4	-1, +1, +1	+1, +1, +1	+0.5, -1, -1	-1, +1, +0.7	-0.1, -0.2, -1	+1, -0.5, -1	+1, +1, +1
x_{\max}	$x_1, x_2,$ x_4	-1, -1, -1	-1, -1, -1	+1, +1, +1	+0.3, -1, -1	+1, +1, +1	+0.4, +1, +1	-0.7, -1, -1

Оценки коэффициентов моделей и обобщающих показателей G характеризуют индивидуальное и совместное влияние аморфного кремнезема, соотношения фракций песка и содержания стеклянной фибры на уровень свойств мелкозернистого бетона. Визуализировать это влияние помогают представленные на рис. 1 отображения однофакторных локальных полей при значениях двух других факторов, соответствующих минимальному и максимальному уровню свойства.

Как видно по оценкам в табл. 2 и 3 и графикам на рис. 1, фибра ожидаемо вносит наиболее мощный вклад в улучшение свойств, связанных с вязкостью разрушения. Максимумам прочности при изгибе, коэффициента K_{1c} и ударостойкости соответствует верхняя граница исследуемого диапазона GF . Наиболее впечатляющий прирост (7 раз, в основном за счет армирования) получает ударостойкость.

Заметное снижение прочности на сжатие с увеличением содержания стеклянной фибры

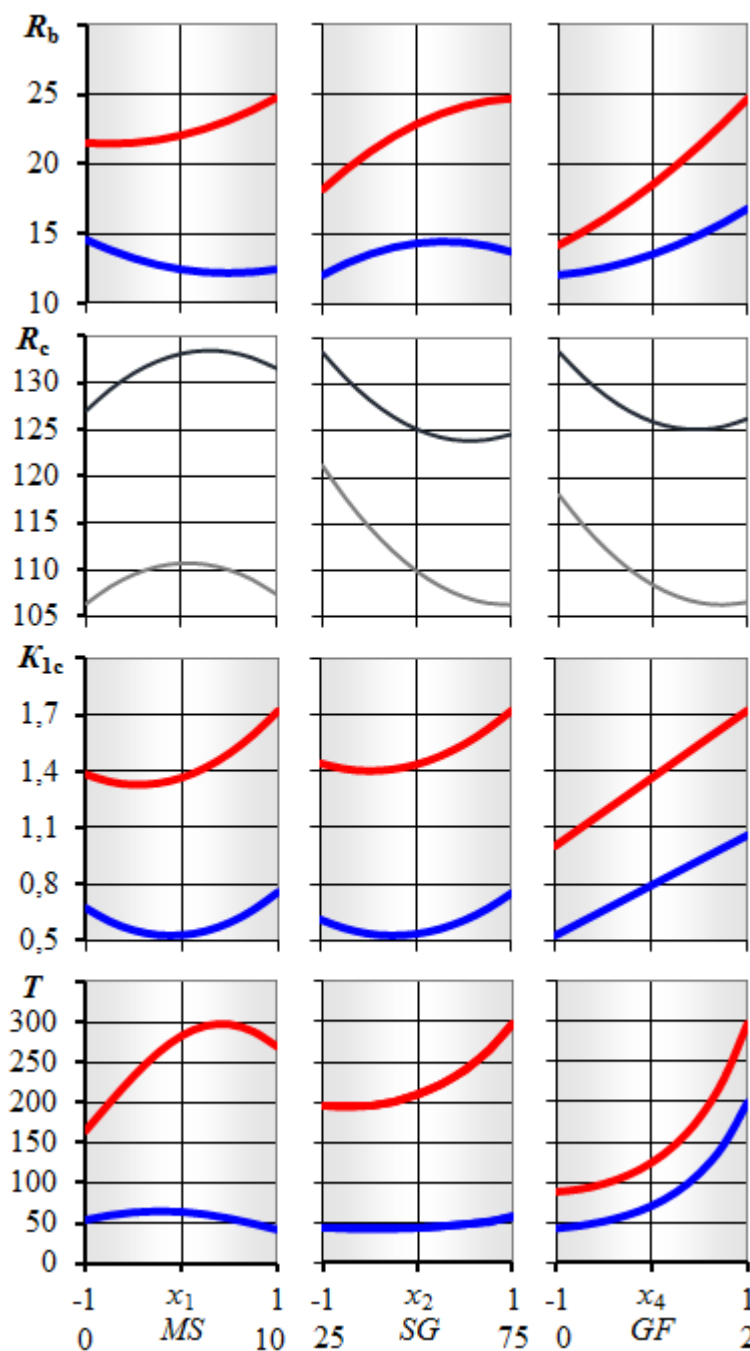


Рис. 1. Однофакторные зависимости в зонах экстремумов

соответствует оценкам в других работах [14-15], 20-30%, в зависимости от водо-цементного отношения. Как отмечается в [14], чтобы повысить прочность при изгибе, «приходится жертвовать» прочностью при сжатии. Это объясняют [15] тем, что она определяется главным образом прочностью матрицы, а тонкие и гибкие стеклянные нити могут ослабить сечение цементной матрицы.

Влияние активной минеральной добавки становится заметно позитивным в зонах максимумов свойств, для R_b , K_{1c} и T при повышенном количестве фибры. В ряде работ, в частности в [2, 16], показывается необходимость введения вместе с фиброй активных микрочастиц, таких как метакаолин и микрокремнезем, обеспечивающий более равномерное распределение и больший объем продуктов гидратации, снижение среднего размера пор.

Значимый прирост прочности при изгибе, трещиностойкости, и ударостойкости (рис. 1) показало и добавление более мелкой фракции песка. Снижение при этом прочности на сжатие, вероятно, связано с недостаточно широким распределением размеров зерен в смеси фракций заполнителя, при довольно высоком соотношении «песок:цемент» (1:1, это самая верхняя граница известных рекомендаций [1, 14]).

Выводы. По результатам спланированного эксперимента получены количественные описания влияния добавки микрокремнезема, фракционного состава песка и содержания стеклянной фибры на основные механические свойства цементных композиций. Показано, что при 2-процентном (по массе) содержании фибры композит является высокопрочным материалом для тонкостенных изделий, в том числе, декоративного назначения. Для более конкретных рекомендаций следует иметь в виду особенности структуры межфазных слоев «матрица – стеклянное волокно», с учетом различий условий гидратации [1, 16] вблизи внутренних и внешних стеклянных нитей в пучках. Кроме того, следует исследовать водопроницаемость, морозостойкость и другие свойства, определяющие долговечность материала.

Литература

1. Bentur A. Fibre reinforced cementitious composites / A. Bentur, S. Mindess. 2nd ed. – London-New York: Taylor & Francis, 2007. – 624 с.
2. Qian C.X. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete / C.X. Qian, P. Stroeven // *Cement and Concrete Research*, 30, 2000. – С. 63-69.
3. Marković I. High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilization / I. Marković. – Delft: Delft University Press, 2006. – 211 с.
4. Zych T. Study on water permeability, frost damage and de-icing salt scaling of hybrid fibre reinforced concretes / T. Zych // *Brittle Matrix Composites 11*. – IFTR PAS, 2015. – С. 239-250.
5. Banthia N. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear / N. Banthia, F. Majdzadeh, J. Wu, V. Bindiganavile // *Cement & Concrete Composites*, 48, 2014. – С. 91-97.
6. Alberti M.G. Polyolefin fiber reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions / M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Galvez, M.F. Canovas, I.R. Osorio // *Materials and Design*, 60, 2014. – С. 57-65.
7. Sun W. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete / W. Sun, H. Chen, X. Luo, H. Qian // *Cement and Concrete Research*, 31, 2001. – С. 595-601.
8. Довгань П.М. Влияние стеклянных и полипропиленовых волокон на пределы прочности и ударостойкость фибробетона / П.М. Довгань, А.Д. Довгань // *Вісник ОДАБА*. Випуск № 38. – Одесса: Зовнішрекламсервіс, 2010. – С. 236-241.
9. Довгань П.М. Анализ влияния дисперсных добавок на трещиностойкость фибробетона / П.М. Довгань, А.Д. Довгань // *Науковий вісник будівництва*. Збірник наукових праць. Харків: ХДТУБА, 2010. – С. 203-208.
10. Довгань А.Д. Изопараметрический анализ свойств мелкозернистого бетона, армированного стеклянной и полимерной фиброй / А.Д. Довгань, В.П. Гаврилук // *Вісник ОДАБА*. Випуск № 60. – Одеса: Оптимум, 2015. – С. 91-95.
11. Ляшенко Т.В. Концепция полей свойств – методическая основа извлечения информации из ЭС-моделей в компьютерном материаловедении / Т.В. Ляшенко // *Вісник ОДАБА*. – Одеса, Місто майстрів, 2003. – Вип. 12. – С. 171-179.
12. Вознесенский В.А. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко // *Строительные материалы*, 2006, №3 – Приложение: Наука № 7 – С. 8-11.
13. Вознесенский В.А. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.
14. Рамачандран В. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Д. Бодуэн. – М: Стройиздат, 1986. – 278 с.
15. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
16. Glinicki M.A. Quantification of glassfibre - cement interfacial properties by SEM-based push-out test. RILEM Int / M.A. Glinicki, A.M. Brandt // *Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)*, Mainz (Germany), 2007. – С. 343-350.