

УДК 691.328:519.2

**ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА АРМИРОВАННОГО
СТЕКЛЯННОЙ И ПОЛИМЕРНОЙ ФИБРОЙ**

А.Д. Довгань., В.П. Гаврилюк

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Введение. При создании новых строительных материалов или при управлении качеством известных, в зависимости от предъявляемых требований к показателям их свойств, часто возникает необходимость исследовать поведение материала в изопараметрических условиях [1]. Определение экспериментальным путем оптимальных составов и выбор технологии для изготовления композитов со стабильным уровнем свойства требует проведения большого количества опытов.

Для решения таких задач проф. В.А. Вознесенский предложил использовать изопараметрический анализ (ИПА) на основе экспериментально-статистических моделей (ЭС-моделей). Описанные ЭС-моделями, в зависимости от координат нормализованных входных факторов ($|x_i| \leq 1$), характеристики материала анализируются в условиях стабилизации уровня одного из них $Y = \text{const}$ [1, 2].

Изопараметрический анализ осуществляется по результатам вычислительного эксперимента на двухфакторных локальных полях свойств $Y(x_i, x_j)$, которые получаются из k -факторных ЭС-моделей при фиксации других факторов на необходимых уровнях [3]. Применение комплекса ЭС-моделей свойств композитов позволяет значительно снизить объем проведения натурных экспериментов, повысить достоверность получения результатов, а также извлечь принципиально новую информацию о материале.

Условия натурального эксперимента и моделирование. Для проведения натурального эксперимента, по определению свойств мелкозернистого композита армированного волокнами разной природы (гибридно-дисперсное армирование), применялись следующие сырьевые компоненты:

– в качестве базовых: портландцемент ПЦ II/A-III-500 и кварцевый песок с различным модулем крупности (соотношение по

массе 1:1); суперпластификатор Dynamon SP3 на основе модифицированного акрилового полимера (1.0 % от массы цемента);

– в качестве варьируемых: ферросилиций, заменяющий часть цемента $FC = X_1 = 5 \pm 5$ м.ч. на 100 м.ч. цемента; доля мелкого песка в смеси с крупным $\Pi = X_2 = 50 \pm 25$ м.ч. на 100 м.ч. объема всего песка; волокно армирующее полипропиленовое ВАП $= X_3 = 0.05 \pm 0.05$ м.ч. на 100 м.ч. растворной смеси; щелочестойкое стекловолокно AR $= X_4 = 1 \pm 1$ м.ч. на 100 м.ч. растворной смеси.

Эксперимент проводился по четырехфакторному D-оптимальному плану. Нормализация всех факторов состава бетона $-1 \leq x_i \leq +1$ выполнена по типовой формуле: $x_i = (X_i - X_{oi})/\Delta X_i$.

Для 18-ти композиций определялись критерии качества смеси – одинаковой удобоукладываемости (осадка конуса составила 14-16 см) и затвердевшего композита – плотность (ρ , кг/м³), предел прочности на растяжение при изгибе (R_b , МПа), трещиностойкость (K_{1c} , МПа·м^{0.5}) и ударостойкость (T , Дж).

По результатам физического эксперимента построен комплекс нелинейных четырехфакторных ЭС-моделей [4, 5] со статически значимыми (при риске 0,1) коэффициентами, которые описывают поля физико-механических свойств фибробетона в координатах варьируемых факторов.

$$\begin{aligned}
 R_b = & 16.72 \pm 0x_1 + 1.07x_1^2 + 0.23x_1x_2 - 0.28x_1x_3 + 1.11x_1x_4 \\
 & + 0.79x_2 - 1.44x_2^2 - 1.07x_2x_3 + 1.15x_2x_4 \\
 & + 1.44x_3 + 1.37x_3^2 - 0.75x_3x_4 \\
 & + 2.21x_4 + 0.88x_4^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

Так, модель (1) с 14 отличными от нуля коэффициентами (при $s_3\{R_b\} = 0.27$ МПа) описывает полное поле с обобщающими показателями: $R_{b,max} = 24.7$ МПа (при $x_1 = x_2 = x_4 = +1$ и $x_3 = -1$), $R_{b,min} = 12.1$ МПа (при $x_1 = +0.5$, $x_2 = x_3 = x_4 = -1$), и относительный прирост $\delta\{R_b\} = 2.04$ раз. На рис. 1 показано локальное поле R_b в координатах волокнистых наполнителей (x_3 , x_4) при средних дозировках ферросилиция $X_1 = 5$ и доли мелкого песка в смеси с крупным $X_2 = 50$ м.ч. При этих условиях прочность на изгиб увеличивается в 1,51 раза с повышением содержания фибры до 2,1 % на 100 м.ч. растворной смеси. Соответствующие локальные поля для свойств ρ , K_{1c} и T представлены на рис. 1. Следует заметить, что влияние волокон на эти свойства разное.

Результаты изопараметрического анализа. ИПА проводился на бетонных смесях одинаковой удобоукладываемости при определении композитов равной прочности $R_b = 16$ МПа. Полуширина доверительного коридора определялась как произведение ошибки эксперимента $s_3\{R_b\}$, среднего значения функции дисперсии предсказания $d^{0.5}$ в локальном поле и квантиля стандартного нормального распределения t_α для допустимого риска α [2].

Методом Монте-Карло генерировано 1000 случайных равномерно распределенных составов в области двух факторов (x_3, x_4). Из 1000 сгенерированных координат факторов и уровней свойств фибробетона отобраны 443 композиты, прочность при изгибе которых попадает в доверительный коридор $15 \leq R_b \leq 17$ МПа. Для этих случайных составов строим «коридорные» графики и оцениваем уровни локальных модельно-детерминированных полей свойств.

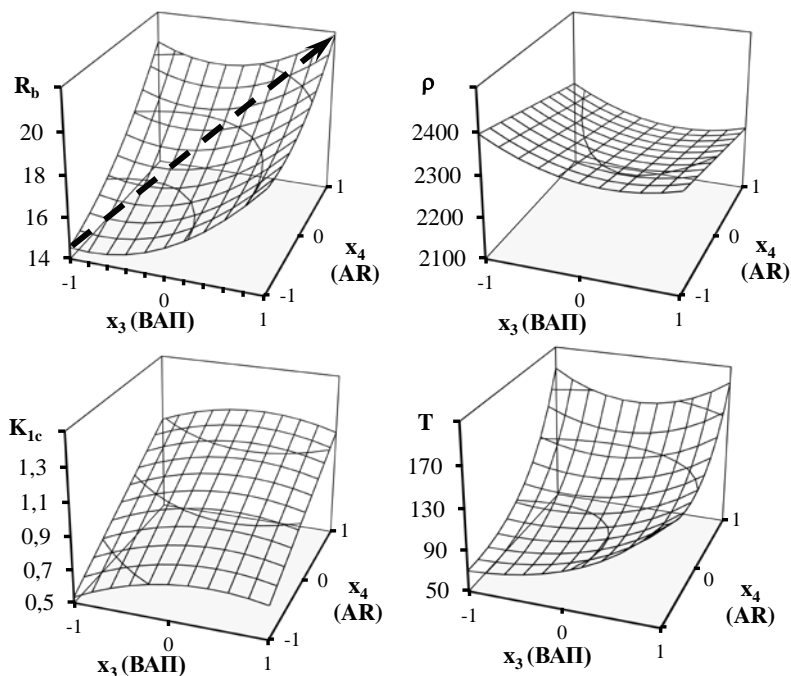


Рис. 1. Локальные поля $Y(x_3, x_4)$ свойств фибробетона в координатах факторов при $x_1 = x_2 = 0$

Как видно из рис. 2 для сохранения постоянной прочности бетона содержание стеклянной фибры должно постепенно увеличиваться от 0 до максимального уровня 2 м.ч. ($x_4 = +1$). Изменение свойств вдоль изолинии $R_b = 16$ МПа связано с уменьшением полипропиленовой фибры от 0,07 до 0,001 м.ч. (x_3 от +0,39 до -0,97). В этих условиях уровни показателей (ρ , K_{1c} и T) фибробетона изменяются следующим образом: плотность композитов понижается на 210 кг/м^3 , уровни трещиностойкости и ударостойкости соответственно повышаются K_{1c} на $0,54 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$, а T на $32,7 \text{ Дж}$. Таким образом, инженерный компромисс следует искать при содержании гибридных волокон в смеси на средних уровнях.

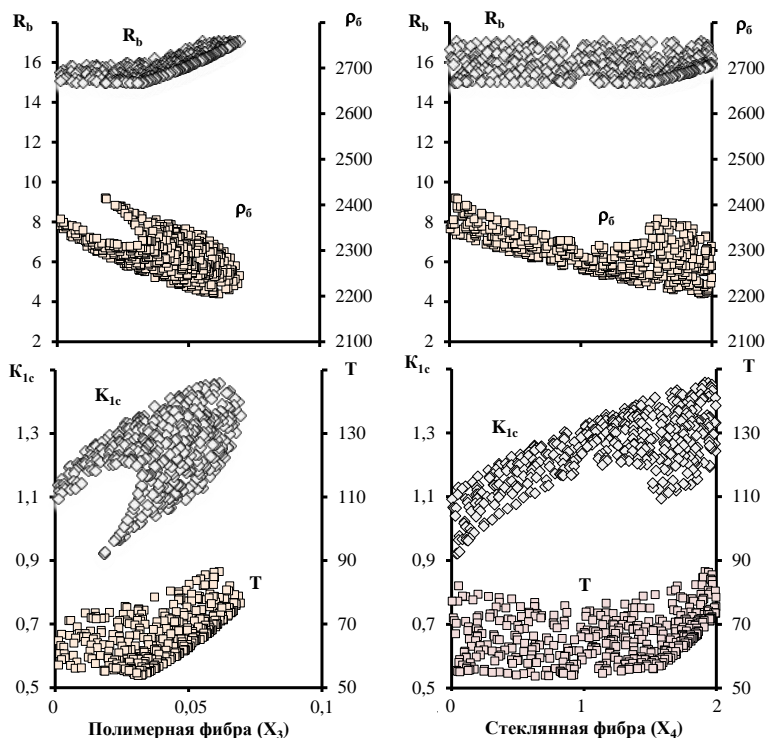


Рис. 2. Результаты ИП-анализа при независимом управлении волокнистых наполнителей композита в диапазоне: $X_3=0,05\pm 0,05$ % и $X_4=1\pm 1$ %

Проанализировать изменение уровней свойств (ρ , K_{1c} и T), в изопараметрических условиях, позволяют обобщающие показатели коридорных графиков (Рис. 2): коэффициент изопараметрического

рассеяния (Ψ_R) и индекс концентрации (Θ_R), которые могут быть определены через коэффициент детерминации R^2 [6].

Из таблицы обобщающих показателей композитов равной прочности следует: связь с K_{1c} наиболее теснее в координатах минерального волокна; наибольшей мерой рассеивания и индексом концентрации характеризуются свойства K_{1c} и T .

Таблица. Обобщающие показатели изменения свойств фибробетона

Y	$ x_3 \leq 0,39$			$ x_4 \leq 1$		
	R^2	Ψ_R	Θ_R	R^2	Ψ_R	Θ_R
ρ	0,31	0,69	0,45	0,51	0,49	1,04
K_{1c}	0,21	0,79	0,27	0,62	0,38	1,63
T	0,41	0,59	0,69	0,26	0,74	0,35

уровнях. По результатам ИПА достаточно достоверно определена область компромиссных соотношений между волокнами разной природы.

Summary

The results of isoparametric analysis based on Monte Carlo method make it possible to determine the optimal levels of glass and polypropylene fibres for allowing the fibrous concrete composition with high indices of quality to be obtained.

1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-ое изд. – М., Финансы и статистика, 1981. – 192 с. 2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном материаловедении // Моделирование и оптимизация композитов: Мат-лы меж. сем. МОК'45. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116с. 3. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. – ОГАСА, НИИВМ. – К., 1996. – 105 с. 4. Довгань П.М., Довгань А.Д. Влияние стеклянных и полипропиленовых волокон на пределы прочности и ударостойкость фибробетона // Вісник ОДАБА. – Одеса. – 2010 р. – Випуск № 38. – С. 236-241. 5. Довгань П.М., Довгань А.Д. Анализ влияния дисперсных добавок на трещиностойкость фибробетона // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. Харків: ХДТУБА. – 2010 р. – С. 203-208. 6. Ляшенко Т.В. Поля свойств строительных материалов (концепция, анализ, оптимизация). Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05 / ОГАСА. – Одесса, 2003. – 34с.

Вывод. Полученные результаты вычислительного эксперимента по ИПА свойств материала из равноподвижных композиций и равнопрочных композитов показывают целесообразность введения гибридных волокнистых наполнителей при их дозировках на срединных