

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

Л.Н.Ксёншкевич, И.В.Барабаш, Е.Н.Крантовская

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Высокопрочные бетоны получают все большее распространение в практике строительства [1, 2]. Применение в технологии бетона современных суперпластифицирующих добавок, тонкодисперсных активных минеральных добавок, в частности, микрокремнезема, позволяет получать бетоны с прочностью при сжатии 100МПа и более. Введение в портландцемент реакционно-способного микрокремнезема совместно с высокоэффективным химическим модификатором интенсифицирует структурообразование твердеющего цементного камня, повышает его плотность и прочность [3-5].

Предположительно, что структурная модификация поверхности зерен цемента в процессе скоростного смешения приведет к еще большей интенсификации процессов структурообразования, что скажется на дальнейшем повышении прочности как цементного камня так и бетона на его основе [6, 7].

Для проверки этого предложения был поставлен трехфакторный эксперимент, в котором варьировались следующие факторы:

$X_1$  – содержание микрокремнезема (МК) в портландцементе (по массе) –  $5\pm 5\%$ ;

$X_2$  – расход вяжущего в бетоне –  $450\pm 100$  кг/м<sup>3</sup>;

$X_3$  – удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) портландцемента –  $400\pm 100$  м<sup>2</sup>/кг.

Предварительная активация вяжущего осуществлялась в смесителе-активаторе со скоростью вращения ротора смесителя 2800об/мин. Для приготовления суспензии вяжущего в активатор последовательно вводились отдозированные количества воды затворения, суперпластификатора С-3 и микрокремнезема.

После 3-х минутной активации суспензия подавалась в ординарную бетономешалку, где смешивались с отдозированными количествами кварцевого песка и гранитного щебня.

Для контроля готовились бетонные смеси аналогичного состава, но без механоактивации вяжущего.

Равноподвижность бетонных смесей достигалась корректировкой расхода воды затворения. Формование образцов-кубов с ребром 10см

производилось на лабораторной виброплощадке с временем вибрации 120 с. Твердение образцов происходило в нормальных условиях при температуре 18-20<sup>0</sup>С и относительной влажности воздуха не менее 95%.

Показатели прочности бетона при сжатии (в 28-ми суточном возрасте) приведены в таблице 1.

Таблица 1

План эксперимента и механические характеристики бетона

| № п/п | Уровни варьирования |                |                | МК, % | Расход вяжущего, кг/м <sup>3</sup> | S <sub>уд.</sub> , м <sup>2</sup> /кг | Отклики                             |   |                                     |   |
|-------|---------------------|----------------|----------------|-------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
|       | x <sub>1</sub>      | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> |       |                                    |                                       | R <sub>сж.</sub> <sup>к</sup> , МПа | R <sub>сж.вод.</sub> <sup>к</sup> , МПа | R <sub>сж.</sub> <sup>а</sup> , МПа | R <sub>сж.вод.</sub> <sup>а</sup> , МПа |
| 1     | -                   | -              | -              | 0     | 350                                | 300                                   | 43,6                                | 41,8                                    | 59,7                                | 56,4                                    |
| 2     | +                   | -              | -              | 10    | 350                                | 300                                   | 52,3                                | 43,3                                    | 73,2                                | 60,6                                    |
| 3     | -                   | +              | -              | 0     | 550                                | 300                                   | 53,9                                | 49,5                                    | 75,5                                | 64,4                                    |
| 4     | +                   | +              | -              | 10    | 550                                | 300                                   | 69,5                                | 61,4                                    | 97,3                                | 85,9                                    |
| 5     | -                   | -              | +              | 0     | 350                                | 500                                   | 52,7                                | 44,8                                    | 68,5                                | 58,2                                    |
| 6     | +                   | -              | +              | 10    | 350                                | 500                                   | 64,3                                | 51,3                                    | 90                                  | 71,8                                    |
| 7     | -                   | +              | +              | 0     | 550                                | 500                                   | 72,8                                | 69,3                                    | 98,3                                | 90,1                                    |
| 8     | +                   | +              | +              | 10    | 550                                | 500                                   | 88,4                                | 71,3                                    | 123,8                               | 99,8                                    |
| 9     | -                   | 0              | 0              | 0     | 450                                | 400                                   | 64,9                                | 55,9                                    | 84,4                                | 72,7                                    |
| 10    | +                   | 0              | 0              | 10    | 450                                | 400                                   | 81,4                                | 67,5                                    | 105,8                               | 94,5                                    |
| 11    | 0                   | -              | 0              | 5     | 350                                | 400                                   | 61,6                                | 57,6                                    | 83,2                                | 77,8                                    |
| 12    | 0                   | +              | 0              | 5     | 550                                | 400                                   | 75,2                                | 66,1                                    | 101                                 | 89,2                                    |
| 13    | 0                   | 0              | -              | 5     | 450                                | 300                                   | 53,9                                | 50,4                                    | 72,8                                | 68,0                                    |
| 14    | 0                   | 0              | +              | 5     | 450                                | 500                                   | 58,1                                | 50,5                                    | 78,4                                | 68,2                                    |
| 15    | 0                   | 0              | 0              | 5     | 450                                | 400                                   | 73,4                                | 63,5                                    | 99,1                                | 89,8                                    |

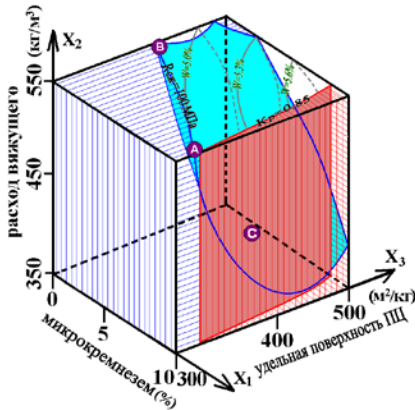
**Примечание:** R<sub>сж.</sub><sup>а</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона на механоактивированном вяжущем; R<sub>сж.</sub><sup>к</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона (контроль); R<sub>сж.вод.</sub><sup>а</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии на механоактивированном вяжущем; R<sub>сж.вод.</sub><sup>к</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии (контроль).

Выбор нескольких вариантов оптимальных составов высокопрочных бетонов был проведен графическим методом по

диаграммам, построенным по соответствующим ЭС-моделям.

На куб были наложены изолинии, отображающие уровни основных физико-механических свойств механоактивированного бетона в возрасте 28 суток, а области, не удовлетворяющие по критериям ограничения, были исключены (рис.1). В качестве критериев ограничения были приняты:

- прочность при сжатии бетона не ниже 100 МПа;
- коэффициент размягчения бетона не ниже 0.85 ( $K_p \geq 0.85$ ).



**Рис.1.** Выбор оптимальных составов высокопрочных бетонов по 3-х мерной диаграмме

при использовании 10 % микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать исходя из экономии энергии на размол вяжущего.

**В** – при расходе вяжущего  $550 \text{ кг/м}^3$ , средней удельной поверхности вяжущего (около  $400 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и без микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения отсутствия необходимости в дополнительной технологической операции – введении микрокремнезема. Помимо того, состав В показывает меньшее водопоглощение по сравнению с составом А, что говорит о его большей потенциальной долговечности. Несомненно, в трехмерном пространстве могут быть выбраны и другие технологические решения в зависимости от необходимых задач.

**С** – при расходе вяжущего  $450 \text{ кг/м}^3$ , удельной поверхности вяжущего около  $380 \text{ м}^2/\text{кг}$  и при отсутствии микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения снижения расхода вяжущего.

Далее в оставшейся, т.е не исключенной ни по одному из названных выше критериев, части факторного пространства были избраны оптимальные составы с учетом желательных критериев – водопоглощения и удельной поверхности вяжущего.

На рис.1 точками в виде кружков показаны два избранных состава с прочностью около 100 МПа и при  $K_p \geq 0.85$ :

**А** – при расходе вяжущего  $550 \text{ кг/м}^3$ , относительно низкой удельной поверхности вяжущего (около  $320 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и

Однако поскольку графический анализ трехмерного факторного пространства является хоть и наглядным, но не отличается большой точностью в областях далеких от граней куба, а расход вяжущего существенно влияет на многие свойства бетона, нами был выполнен второй вариант графического поиска оптимальных составов. Известно, что в зависимости от типа и назначения бетонной или железобетонной конструкции может быть необходима большая или меньшая прочность бетона, поэтому рассматривалось три варианта выбора оптимального состава высокопрочного бетона по 2-у мерным диаграммам.

Варианты отличались расходом вяжущего: 350, 450 и 550 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует уровням варьирования фактора  $x_2$ , равным  $-1$ ,  $0$  и  $+1$ . При соответствующих зафиксированных уровнях фактора  $x_2$  были построены диаграммы в виде квадратов, отображающих влияние количества микрокремнезема ( $x_1$ ) и удельной поверхности вяжущего ( $x_3$ ) на уровень прочности при сжатии механоактивированных бетонов в возрасте 28-ми суток, а также на уровни водопоглощения и коэффициента размягчения этих бетонов. Далее на три диаграммы были наложены изолинии, отображающие уровни данных основных физико-механических свойств материала. После наложения диаграмм области факторного пространства, не удовлетворяющие по критериям ограничения, были исключены. В качестве общего для всех трех вариантов критерия ограничения был принят коэффициент размягчения бетона не ниже 0.85 ( $K_p \geq 0.85$ ). В качестве второго критерия ограничения была принята прочность при сжатии: 80, 90 и 100 МПа в зависимости от количества вяжущего (соответственно 350, 450 и 550 кг/м<sup>3</sup>).

Далее в оставшейся, т.е. не исключенной ни по одному из названных выше критериев, части факторного пространства были избраны оптимальные составы композитов с учетом желательных критериев – водопоглощения, удельной поверхности вяжущего и прочности (рис.2).

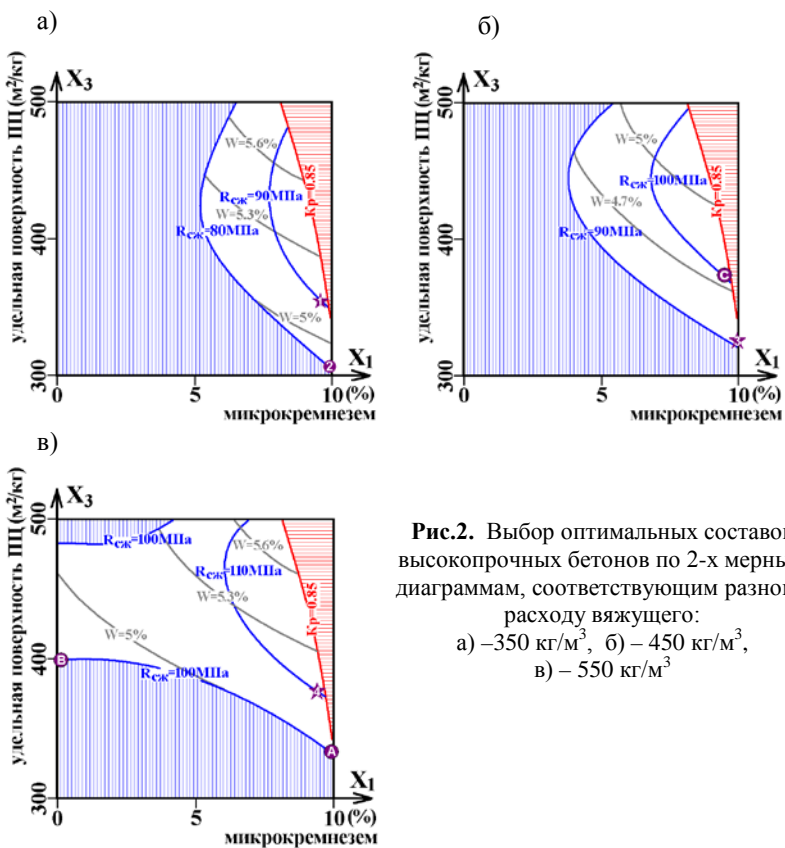
При расходе вяжущего 350 кг/м<sup>3</sup> (рис.2 а) были выбраны два оптимальных состава:

1 – соответствует материалу с прочностью 90 МПа при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 5.1% (помечен звездочкой).

Достигается при удельной поверхности вяжущего около 350 м<sup>2</sup>/кг при введении около 9.5% микрокремнезема.

2 – соответствует материалу с прочностью 80 МПа при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 5% (помечен кружком). Достигается при удельной поверхности вяжущего около 310 м<sup>2</sup>/кг при введении 10% микрокремнезема. Данный состав имеет более низкую

прочность, однако он является более дешевым за счет экономии энергии на размол вяжущего.



**Рис.2.** Выбор оптимальных составов высокопрочных бетонов по 2-х мерным диаграммам, соответствующим разному расходу вяжущего:

- а) – 350 кг/м<sup>3</sup>, б) – 450 кг/м<sup>3</sup>, в) – 550 кг/м<sup>3</sup>

При расходе вяжущего 450 кг/м<sup>3</sup> (рис.2 б) также были выбраны два оптимальных состава:

**З** – соответствует материалу с прочностью 90 МПа при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 4.6% (помечен звездочкой). Достигается при низкой удельной поверхности вяжущего – около 330 м<sup>2</sup>/кг при введении 10% микрокремнезема. Может быть рекомендован с точки зрения низкого водопоглощения и использования вяжущего с низкой удельной поверхностью.

**С** – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при  $K_p \geq 0.85$

и показывает водопоглощение около 4.8%.

При расходе вяжущего 550 кг/м<sup>3</sup> (рис.2.в) были выбраны три оптимальных состава:

**А** – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 5.1%. Соответствует составу **А** на рис.2.

**В** – соответствует материалу с прочностью 100 МПа при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 4.8%. Соответствует составу **В** на рис.2.

**4** – соответствует материалу с повышенной до 110 МПа прочностью при  $K_p \geq 0.85$  и показывает водопоглощение около 5.2% (помечен звездочкой). Достигается при удельной поверхности вяжущего около 390 м<sup>2</sup>/кг и при введении около 9% микрокремнезема. Может быть рекомендован с точки зрения наибольшей достигаемой прочности материала при сохранении необходимого уровня коэффициента размягчения.

Таким образом, отобраны семь рекомендуемых оптимальных составов высокопрочных бетонов, каждый из которых может быть использован в зависимости от требуемых для конкретной задачи уровней прочности и экономической целесообразности с учетом текущих цен на энергоносители, оборудование и сырье.

### ***Выводы***

Экспериментально установлено, что механоактивация рядового портландцемента в присутствии микрокремнезема и суперпластификатора С-3 позволяет получать тяжелые бетоны классов С35/45...С90/105 с расходом вяжущего от 450 до 550 кг/м<sup>3</sup>. По результатам исследований оптимизированы составы высокопрочного бетона классов С70/85 ... С90/105.

### **Summary**

**The paper examines the problems associated with production of high-performance concretes by using a general purpose blended Portland cement which is to be mechanoactivated and modified with an organomineral additive, and with optimization of concrete mixes taking into account cost-effective use of resources.**

## *Литература*

1. Aïtcin P.-C. The art and science of high-performance concrete / P.-C. Aïtcin // Nelu Spiratos Symposium on Siperplasticizers. - Bucharest, Romania, June 2003. - P. 69-88.
2. Schmidt M. Ultra High Performance Concrete (UHPC)/ M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslake (eds.): // — Proceedings of the 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete; Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Universitat Kassel, Heft 3, 2004.
3. Каприелов С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона/ С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов//Бетон и железобетон, 1992. № 7. - С.4-7.
4. Каприелов С.С. Высокопрочные бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором. / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Е.С. Силина, Н.Ф. Жигулев, С.Т. Борягин // Транспортное строительство, № 11, 2000, с.24-27.
5. Батраков В.Г. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон./ В.Г.Батраков, С.С. Каприелов, Ф.М.Иванов, А.В.Шейнфельд. // Бетон и железобетон, 1990, № 12, С.15-17.
6. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язючих речовин.- Навчальний посібник.- Одеса. Астропрінт, 2002. - 100с.  
Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. - Симферополь: Таврия, 1997.-180с.