

М. ЦИЯК, канд. техн. наук, **С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук,
Университет Варминского-Мазурский в Ольштыне, Польша

КОМПРОМИССНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Побудовано та проаналізовано експериментально-статистичні моделі для оптимізації впливу модифікуючих добавок та параметрів зернового складу на показники якості бетону, що самоуплотнюється.

Created and analyzed experimental-statistical models for optimization of modificative add-mixtures influence and granulometric composition parameters to quality index of self-compacting concrete.

Введение.

Самоуплотняющийся бетон – *Self-Compacting Concrete* (SCC) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях [1]. Высокая эффективность SCC способствовала созданию рабочей группы RILEM (1996) для разработки рекомендаций по использованию SCC. В 2004 году организован технический комитет 205-DSC “Долговечность самоуплотняющегося бетона”. В результате исследований была разработана классификация самоуплотняющихся бетонов (*Specification and Guidelines for SCC*), определяющая их назначение и области применения.

Как правило, для выполнения условий самоуплотнения состав обычного бетона должен быть существенно усложнен за счет введения специальных химических и минеральных добавок (с размером дисперсных частиц < 0,125 мм – микрокремнезем, зола-унос, молотый кварцевый песок и др.), многофракционного заполнителя. Характерно, что в случае SCC требования к прочности не всегда являются первостепенными (так как обеспечиваются высокой водоредуцирующей способностью поликарбоксилатных и других «мощных» суперпластификаторов, снижающих В/Ц до 0,3 – 0,4); приоритетными становятся показатели диаметра и времени расплыва смеси под собственной массой, водоотделения, вытеснения воздуха и сегрегации. Видимые компоненты, присутствующие в количестве не менее 35 % объема смеси, стабилизируют и повышают её вязкость, удерживая зерна крупного заполнителя; при этом смесь в присутствии СП расплывается без вибрации.

Пока не существует общепризнанной методики подбора состава SCC, требования к его качеству сформулированы в общем виде; существующие рекомендации построены на новых экспериментальных тестах («L-Box Test», «U-Funnel Test» и др.), имитирующих поведение смеси в конструкции [2, 3]. Разработки составов и испытания, применимые к обычным бетонам, не отражают всех свойств SCC (что приведёт, вероятно, в будущем к противоречию с существующими нормативными документами).

Принимая концепцию проектирования самоуплотняющегося бетона как грубодисперсного композиционного материала, теоретический анализ можно вести в отношении двухкомпонентной системы – минеральная матрица и «каркас» заполнителей. Факторы, влияющие на свойства каркаса – форма, поверхность и рельеф зерен, плотность, соотношение и др. Факторы, определяющие свойства «матрицы» – химические добавки, состав и дисперсность цемента, минеральных добавок, их совместимость и др.

Многокомпонентность состава и значительное количество критериев качества определяют бетоны типа SCC как «удачный» объект для моделирования и многопараметрической оптимизации [10], особенно при оценке возможности использования новых компонентов и необходимости уменьшения интеллектуальных, материальных и временных затрат на проектирование. При исследовании моделей выявляются оптимальные концентрации добавок $Z_{opt} = f(X)$, области экстремума значений свойств Y_{max} и Y_{min} , допустимых Ω_d и компромиссных Ω_k решений при нормированных показателях Y_{norm} и решаются другие инженерные задачи [4].

Для анализа влияния факторов и оптимизации состава SCC использованы экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные при реализации 27 опытных точек (составов) по D-оптимальному плану эксперимента 11_2 ; В группе факторов управления свойств «матрицы» изменялись на трех уровнях дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора BV-10 ($SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4$ % от массы цемента), содержание наполнителя (Н) – золы уноса фильтров ТЭС, «poric lotny», в диапазоне ($Por = 30 \pm 10$ %) и водоцементное отношение ($C/W = 0,43 \pm 0,03$). Свойства «каркаса» регулировались долей песка в смеси заполнителя ($Pr = 50 \pm 5$ %) и содержанием мелкой фракции щебня 4 – 8 мм в крупной 8 – 16 мм: ($Z_d = 50 \pm 10$ %). Водо-содержание смесей менялось от 172 до 196 dm^3/m^3 , расход дорожного цемента CEM I 42,5 HSR/NA – постоянный $C = 400$ kg/m^3 .

В соответствии с рекомендациями EFNARC [3] экспериментально опреде-

лялись диаметр расплыва бетонной смеси D , см, время T_{50} и T_{70} расплыва до $D_1 = 50$ см и $D_2 = 70$, показатель сегрегации SR (как процентное отношение растворной части смеси в нижней и верхней части вибрированного вертикально трубчатого образца), воздухововлечение ВВ, а также прочность затвердевшего бетона R в возрасте 3 и 28 суток нормального твердения.

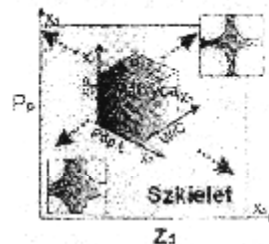


Рис. 1. Схема поиска рецептурных решений

Так, для расплыва конуса смеси получена (при ошибке эксперимента $s_2 = 1,7$ см и одностороннем риске $\alpha = 0,2$) структурированная модель второго порядка, в которой выделены блоки двух подсистем факторов:

$D = 69,1$	$+6,8x_1$	$\pm 0,0x_2^2$	$+4,6x_{12}$	$15,3x_{13}$	$-1,7x_{14}$
	$\pm 0,0x_2$	$-6,5x_3^2$		$\pm 0,0x_{21}$	$+2,8x_{15}$
	$+9,3x_1$	$\pm 0,0x_3^2$		(a)	$+1,8x_{24}$
	$-4,1x_4$	$-4,7x_4$	$-1,0x_{45}$		$\pm 0,0x_{15}$
	$-1,9x_5$	$-0,0x_5^2$	(b)		$+2,3x_{14}$
					$+1,3x_{15}$ (c)

Блок (a), включающий оценки влияния на D трех факторов «матрицы» при среднем уровне факторов «каркаса», описывает локальное поле $D(x_1, x_2, x_3)$ при $x_4, x_5 = 0$; изменение этого поля с изменением количества песка и крупного заполнителя отражают блоки (b) и (c).

С другой стороны, блок (b) соответствующий локальному полю $D(x_4, x_5)$ при $x_1, x_2, x_3 = 0$, оценивает влияние доли песка и крупности щебня при средних уровнях дозировки СП, Н и В/Ц. Блок (c) представляет изменения в эффектах взаимодействий.

Максимальный уровень поля (1) $D_{\text{max}} = 79$ см, минимум $D_{\text{min}} = 23$ см, т.е.

изменение этого свойства в исследуемой области составов более чем трехкратное.

На рис. 2 показано влияние пяти факторов в области минимума и максимума D , что моделирует условия «хорошей» и «плохой» рецептуры бетона [4]. Введение СП в любом случае приводит к увеличению расплыва, как и повышение водосодержания бетонной смеси. Концентрация дисперсной минеральной добавки имеет оптимум $\text{Pop}_{\text{opt}} = 32,9\%$, как и содержание песка в смеси $\text{Pr}_{\text{opt}} = 48\%$. Аналогичный анализ T_{50} указал на удлинение времени расплыва при повышении количества песка и минеральной добавки, быстро адсорбирующей жидкую фазу.

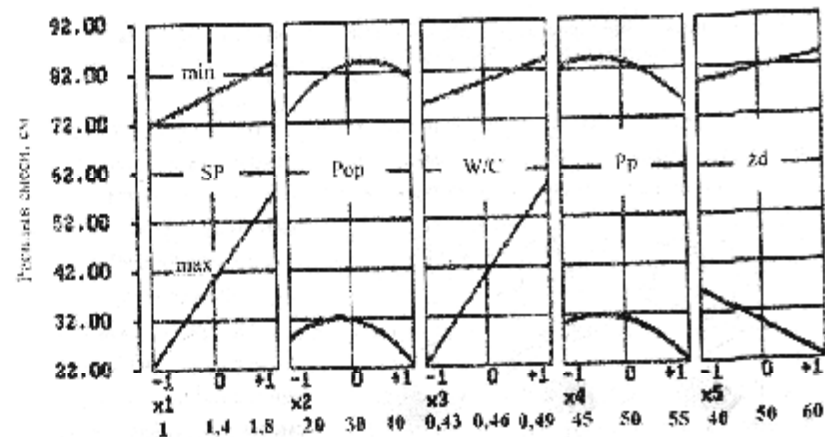


Рис. 2. Зависимости влияния факторов состава в области максимума и минимума показателя D

Одним из обобщающих показателей полей свойств материалов, характеризующих устойчивость технологии, является объем допустимой области $0 \leq \Omega_d \leq 100\%$, относительный к исследуемому факторному пространству (в нормализованных переменных). Чем ближе значения Ω к нулю, тем сложнее технологу реализовать выбранное в этой области эффективное решение [5].

На рис. 3б показана диаграмма влияния трех факторов матрицы на показатель расплыва D_2 , определенный экспериментально (рис. 3а), при фиксированном объеме песка $\text{Pr} = 50\%$ и 50%-ном содержании щебня фр. 4/8.

Область составов, обеспечивающих хорошую растекаемость смеси

($D_2 \geq 70$ см), находится в зоне высоких концентраций СП ($X_1 = 1,8$ %), повышенного содержания воды и средних дозировок наполнителя, занимая $\Omega_d = 45$ % объема факторного пространства.

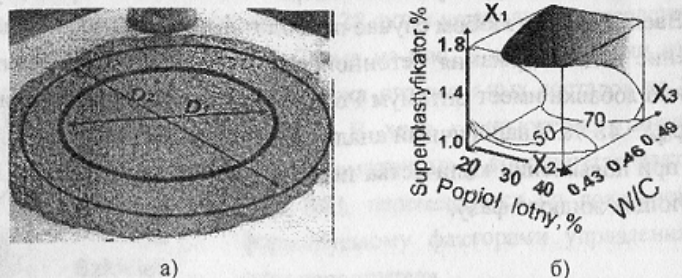


Рис. 3. Оценка характеристик расплыва D смеси (а) и диаграмма влияния факторов «матрицы» ($x_4, x_5 = 0$) с выделением области $D_2 \geq 70$ см (б)

По мере изменения качественного и количественного состава зерновой части, объем области допустимых решений существенно меняется: от $\Omega_d = 5$ % при высоком содержании песка и большом насыщении смеси крупным щебнем, до $\Omega_d = 55$ % при оптимальных $Pp = 45$ % и $z_d = 50$ % (рис. 4).

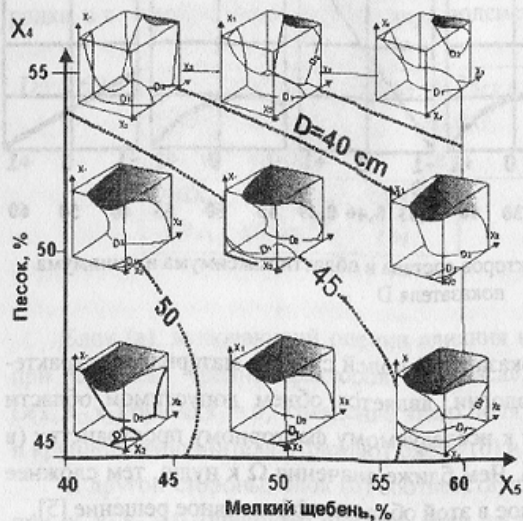


Рис. 4. Девять трехфакторных номограмм, показывающих зависимость эффективности матрицы от факторов «каркаса» значений показателей качества SCC (в частности, $SR \leq 1$ %, $D \geq 70$ см,

$R_{28} \geq 60$ МПа) и центур (рис. 5).



Рис. 5. Трансформация области компромиссных решений при изменении уровней параметров «каркаса» (точки отвечают минимально допустимой концентрации СП, $W/C = 0,43$)

В случае уменьшения количества мелкой фракции щебня $z_d < 45$ % и песка $Pp < 48$ % существенно возрастает расслаиваемость смеси; в то же время добавление песка свыше 55 % приводит к резкому ухудшению расплыва.

Если область Ω оказывается меньше 15 %, то технологические решения становятся, как правило, неустойчивыми из-за увеличения в ней доли, связанной с риском моделирования [5].

Поэтому выполнить требования ($SR \leq 1$ %, $D \geq 70$ см, $R_{28} \geq 60$ МПа) практически весьма сложно без оптимизации параметров зернового состава.

Так как к наиболее дорогостоящим компонентам относятся поликарбоксилатный суперпластификатор, важна оценка возможности снижения его расхода без ухудшения качества бетонной смеси и затвердевшего бетона.

Сравнение координат точек на рис. 5 показывает, что без изменения свойств бетона за счет корректировки, в частности, количества золы уноса возможно снизить количество СП практически в 1,2...1,3 раза.

Проведена идентификация оптимизированных составов относительно принадлежности к бетонам класса SCC.

Так состав № 5 бетонной смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$): С = 400, W = 187, P = 756, щебень фр. 4/8 $z_1 = 404$, щебень фр. 8/16 $z_2 = 431$, SP - 6 кг, Pop = 154 кг обеспечивает распыляемость $d = 73$ см, что соответствует [2] классу SF2 по распыляемости ($d = 66 \dots 75$ см).

По показателю segregation – класс SR2 (раствороразделение менее 5 %).

Класс SF2 определен по времени распыления $T_{30} = 5$ с и истечению из воронки «Funnel» ($T_1 = 12$ с).

Согласно проведенного теста «L-Box» (рис. 6а), устанавливающего способность смеси к самовыравниванию, бетонная смесь относится к классу PA2 (отклонение от горизонтали менее 0,2).

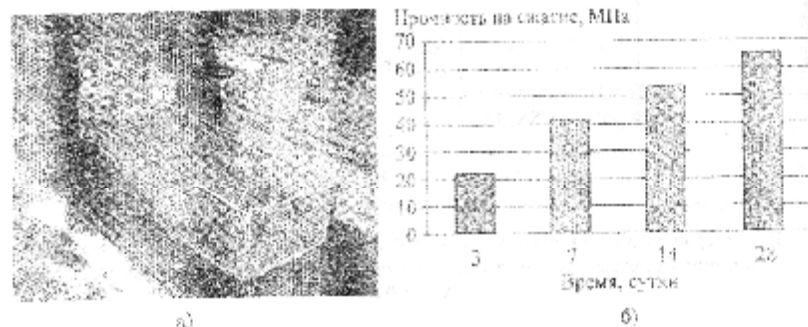


Рис. 6. Тест «L-Box» для оптимизированной смеси (а) и рост во времени (б) и рост прочности (Состав № 3)

Бетон достаточно быстро набирает прочность, и в «марочном» возрасте $R_{28} = 65,3$ МПа, что соответствует классу B60.

Неоспоримым преимуществом SCC противопоставляются более высокие затраты на материалы, разработку рецептуры, производство, обеспечение качества и контроль, по сравнению с обычным бетоном.

Сферы применения SCC ограничены случаями, когда он может обеспечить наилучшее соотношение затрат и эффекта, например, в мостостроении, в многотажном монолитно-каркасном домостроении, при высоком насыщении армирующими элементами железобетонных конструкций.

Список литературы: 1. *Atcin P.C. High-Performance Concrete / P.C. Atcin / E & FN Spon, 1998.*
2. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use, 2005.*
3. *Specification and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, 2002.*
4. *Козлов С.В. Модифицированные бетоны: изготовление и оптимизация / С.В. Козлов // Строительные материалы и*

УДК 542.63 : 544.344: 62-523.2

Д.О. СТОРОЖЕНКО, канд. хім. наук;
О.Г. ДРЮЧКО, канд. хім. наук;
І.О. ІВАНИЦЬКА, канд. хім. наук;
Н.В. БУНЯКІНА, канд. хім. наук; ІНТУ, г. Полтава

СПОСІБ ПЕРЕМІШУВАННЯ ГОМОГЕННИХ І ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

Розглядається спосіб перемішування гомогенних і гетерогенних систем торoidalним магнетичним елементом-амігувачем, який приводиться в обертальний рух електромагнітним полем змінної частоти близької до власних значень об'єкту перемішування. Проаналізується варіанти технічних рішень його практичної реалізації, аналізуються їх можливості.

The mixing method of homogeneous and heterogeneous systems by toroidal magnetic element - amalgamator which is resulted in rotary movement by electromagnetic field of replaceable frequency approximate to own frequency value of fluctuations of the mixing object have been considered as well as variants of technical decisions of its practical realization and their opportunities.

Пошук нових технологічних схем одержання сучасних спеціальних, функціональних оксидних РЗН-вмісних матеріалів з використанням ряду різноманітних методик й комплексних технологій [1] передбачає знання взаємної поведінки структурних компонентів в широких температурних інтервалах і певних концентраційних співвідношеннях, використання вихідних речовин високої чистоти і застосування досконалих способів їх змішування. Одними із найбільш перспективних серед них є хімічні бездифузійні методи синтезу, які мають ряд переваг у порівнянні із традиційною керамічною технологією синтезу. В них змішування вихідних реагентів (розчинних солей відповідних металів чи їх кристалогідратних форм), взятих у необхідних пропорціях, відбувається при сумісному виділенні продукту із рідкої фази (методи терміч-