



*Міністр регіонального розвитку, будівництва
та житлово-комунального господарства
України Анатолій Близнюк*

Шановні працівники будівельної галузі!

*Прийміть найщиріші вітання з нагоди професійного свята – Дня будівельника.
Дозвольте висловити вам слова поваги та вдячності за професіоналізм і щоденну
сумлінну працю, яка є надійною опорою економіки країни.
Бажаю вам і вашим родинам здоров'я, добра, щастя, затишку і достатку!
Успішних вам проектів, творчого натхнення, шани і поваги від людей!*

НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ

УДК 668.98

Коваль С.В., доктор техн. наук, професор;

Наджах Абид, аспірант, Одеська державна академія будівництва та архітектури, г. Одеса;

Ситарски М., магістр-інженер, Вармінсько-Мазурський університет, г. Ольштын, Польща

САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН: ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ТЕСТИРОВАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА

Самоуплотняющийся бетон – Self-Compacting Concrete (SCC) – бетон из смесей, способных уплотняться без вибрации, полностью заполняющих форму в густоармированных конструкциях [1–3]. Бетоны типа SCC используются в Польше, начиная с 1999 года, чему способствует наличие высокоэффективных суперпластификаторов и дисперсных добавок, и, главное, потребность в таких бетонах на объектах транспортного, гидротехнического и жилищного строительства, в первую очередь, при высоком насыщении армирующими элементами железобетонных конструкций [1].

Для строительной индустрии Украины проблема создания SCC достаточно нова; имеющиеся фрагментарные исследования не привели еще к массовому распространению таких бетонов, в том числе из-за высокой стоимости поликарбоксилатных суперпластификаторов, ограниченности базы тонкодисперсных компонентов, заполнителей с рациональной гранулометрией (как показывает анализ [4], по плотности упаковки и другим параметрам применяемые в Польше смеси фракции 2/4, 4/8, 8/16 мм более эффективны, чем смеси из стандартных фракций – 5/10 и 10/20, применяемых в Украине).

Бетонная смесь только тогда может быть классифицирована как самоуплотняющаяся, когда требования относительно этих четырех свойств будут выполнены. Согласно рекомендациям [2], диаметр расплыва из стандартного конуса (конус Абрамса) должен быть в диапазоне 550–850 см.

Тест «расплыва конуса» (Slumpflow-Test) основан на измерении диаметра расплыва и времени, за которое смесь расплывется на 50 (Т50) или 70 см (Т70). На основе результатов этого теста оценивается класс консистенции бетонной смеси.

Для оценки пластической вязкости используется время истечения из V-образной воронки («Funnel-Test») [2]. Смесь считается самоуплотняющейся, если время истечения T_v находится в пределах $8 \div 25$ секунд. На практике стремятся к тому, чтобы время истечения не превышало 12 с.

Способность к самовыравниванию (L-Vox-Test) бетонной смеси при прохождении через арматурные стержни оценивается по разнице высоты уровня смеси на противоположных сторонах загрузочного ящика аппарата (рис. 1 в), а также времени ее расплыва [3].

Однородность и сопротивление смеси сегрегации является одним из главных параметров в случае бетонной смеси с расплывом (760–850 мм), а также когда технология строительства способствует сегрегации (транспорт смеси, тонкостенные вертикально формируемые элементы и др.).

Основанием для установления класса по сегрегации является тест выделения цементного раствора из бетонной смеси (Sieve segregation test). В этой методике определяется в процентах количество смеси, которая проходит через сито (5x5 мм) в отношении ко всему количеству бетонной смеси. Допустимая сегрегация самоуплотняющейся смеси составляет 20% [2].

В таблице 2 представлены рекомендуемые параметры смеси для приведенных классов свойств самоуплотняющихся бетонов в зависимости от вида конструкции, в которой должен быть использован бетон.

Особенности состава. При проектировании состава самоуплотняющегося бетона базовым условием является обеспечение необходимых реологических свойств и однородности бетонной смеси при выполнении требований к прочности и долговечности затвердевшего бетона.

Необходимые требования к технологическим свойствам бетонной смеси достигается за счет особенностей состава (табл. 2).

Одно из главных условий получения самоуплотняющихся бетонов – это использование высокоэффективных добавок-суперпластификаторов. При выборе суперпластификатора опытным путем оценивается совместимость добавки и применяемого цемента. Выбор суперпластификатора производится с учетом используемых минеральных добавок, присутствия в составе бетона добавок иных типов, температуры окружающей среды, необходимого времени сохранения технологических свойств бетонной смеси и т.п. Время сохранения свойств бетонной смеси для монолитного строительства составляет 1–1,5 часа, для заводских условий это время может быть существенно уменьшено.

Выбор суперпластификатора производится с учетом объема вовлекаемого воздуха, который после укладки бетонной смеси должен быть минимальным (если не оговариваются специальные требования). Рекомендуется использование добавок-стабилизаторов, повышающих вязкость бетонной смеси для снижения сегрегации и водоотделения (в случае необходимости). В этом случае необходимо учитывать возможное изменение показателей удобоукладываемости бетонной смеси и снижение прочности бетона.

Минеральные добавки используются для снижения расхода цемента, уменьшения тепловыделения бетона, повышения вязкости бетонной смеси (уменьшения расслоения и водоотделения), регулирования прочности и уменьшения усадки (в том числе как материалы для внутреннего ухода за бетоном). В качестве минеральных добавок используется микрокремнезем, метакаолин, зола уноса, молотый гранулированный шлак, молотый кварцевый песок, молотый известняк твердых и мягких пород (в зависимости от требований к прочности бетона).

Для повышения показателя расплыва бетонной смеси наиболее эффективен щебень фракции с минимальным количеством лещадных зерен и речной гравий. Эффективно использование щебня фракции 5–10 мм, что позволяет уменьшить расслаиваемость бетонной смеси при повышении характеристик растекаемости и самоуплотнения.

Для приготовления самоуплотняющихся бетонов необходим совместный подбор гранулометрического состава заполнителя (песка и щебня). Целесообразно использовать непрерывную гранулометрию, что, в ряде случаев, требует обогащения песка и щебня.

Необходимо учитывать увеличение водопотребности бетонной смеси и возможное понижение прочности затвердевшего бетона при использовании повышенного количества пылевидных фракций заполнителя и увеличенного количества песка (что должно быть компенсировано понижением В/Ц при рациональном выборе и корректировке количества суперпластификатора).

Самоуплотняющаяся бетонная смесь должна обладать пониженной чувствительностью к изменениям технологии. Для этого обязательным условием является проектирование бетонной смеси с учетом возможных изменений состава, условий транспортирования и выполнения бетонных работ, в том числе колебаний температуры.

Проектирование состава самоуплотняющихся бетонов является задачей значительно более сложной, чем проектирование составов обычных бетонов. Это связано с тем, что бетонная смесь представляет собой сложную многофакторную систему со значительно большим объемом взаимодействий составляющих. Основные требования предъявляются к реологическим свойствам и стабильности бетонной смеси.

Первым этапом проектирования состава SCC является определение требуемых реологических параметров и классов консистенции бетонной смеси с учетом методов и условий проведения процесса бетонирования. Второй этап – качественный выбор компонентов и состава бетонной смеси. Необходимость достижения регламентируемых характеристик реологических свойств бетонной

смеси устанавливает весьма жесткие требования к составу смеси и характеристикам используемых материалов. Третьим этапом является идентификация реологических эффектов действия суперпластификатора.

В настоящее время отсутствуют стандартизированные или повсеместно применяемые методики подбора состава бетона SCC. Ниже представлено две наиболее описываемые методики.

Методика №1. (Японский метод). Методика, разработанная по японскому образцу, включает лабораторные исследования исходных материалов и такие этапы, как исследования цементного теста, испытания раствора и исследования бетона.

К исследованиям цементного теста относят изучение составов мелких пылевидных частиц (цемент + заполнитель) относительно их водопотребности, а также их чувствительность при затворении разным количеством воды. С этой целью проводятся испытания на расплыв цементного теста без встряхивания с использованием конуса Хегерманна (применяемого в испытаниях цемента).

Проектирование начинается с расчета необходимого В/Ц исходя из требуемой прочности бетона, но не выше 0,5. На следующем этапе изготавливается цементно-песчаный раствор:

$$V_p = V_n + V_v + V_{\text{ц}} + V_{\text{мд}}, \quad (1)$$

содержащий около 40% песка:

$$V_n = 0,4V_p \quad (2)$$

Минеральная матрица бетона (цементная паста) составляет 60% объема цементно-песчаного раствора, отношение В/Ц назначается в пределах 0,30...0,35 или $V_v/(V_{\text{ц}} + V_{\text{мд}}) = 0,8...1,1$ (чем меньше величина в указанном диапазоне, тем раствор, а также изготовленная на ее основе бетонная смесь, более стойки к сегрегации).

Общее количество воды в растворе не должно превышать 175...185 $\text{дм}^3/\text{м}^3$. Низкое количество воды приводит к использованию более высоких, чем в обычных литых бетонах, дозировок суперпластификатора, но позволяет при этом увеличить прочность бетона или снизить расход цемента при увеличении количества минеральной добавки. Содержание дисперсной минеральной добавки назначается из условия $V_{\text{мд}}/V_{\text{ц}} = 0,8(0,6...1,0)$.

В запроектированный раствор вводится суперпластификатор. Его количество должно обеспечить диаметр расплыва конуса в пределах $200 \leq d \leq 280$ мм. Одновременно раствор должен характеризоваться временем $5 \leq t_m \leq 10$ сек. истечения из V-образной воронки (тест «V-funnel»).

После выполнения вышеуказанных требований в раствор вводится крупный заполнитель объемной концентрации (с учетом объема воздуха $V_{\text{вв}}$):

$$0,5 \leq \phi_k \leq 0,55 \quad (3)$$

Крупный заполнитель может соответствовать таким же требованиям к зерновому составу, как и в случае обычных бетонов. Количество бетонной смеси должно позволять определение расплыва стандартного конуса и показателя самонивелирования (тест «L-box»).

Бетонная смесь проверяется на расплыв конуса, время его расплыва и тест L-box. В случае невыпол-

нения требований к самоуплотнению корректируется дозировка суперпластификатора.

Методика №2. (Модифицированная традиционная методика). Исходной предпосылкой подбора состава является положение о том, что свойства самоуплотняющейся бетонной смеси определяются как свойствами цементной матрицы, так и каркаса заполнителя. Основными факторами, влияющими на свойства СУБ, как и в обычных бетонах, являются:

- свойства минеральной матрицы (вид, класс, водопотребность, удельная поверхность и количество цемента, водоцементное отношение, вид и количество химических и минеральных добавок);

- свойства заполнителя (вид, количество, характеристика поверхности, крупность, плотность истинная и насыпная плотности) его гранулометрический состав и пористость смеси заполнителя и др.;

- степень заполнения межзернового пространства минеральной матрицей, характеризующая коэффициентом раздвижки зерен заполнителя α .

Свойства бетонной самоуплотняющейся смеси можно эффективно регулировать при получении минеральной матрицы с соответствующими реологическими характеристиками, а также коэффициента раздвижки зерен.

Начальный этап проектирования состава минеральной матрицы выполняется по методике №1. Способность к самоуплотнению бетонной смеси можно первоначально оценить на основании диаметра расплыва цементного теста. Чем меньше диаметр расплыва, тем больше цементного теста необходимо для получения требуемого расплыва бетонной смеси.

Рассчитывается объем минеральной матрицы V_M (4), пустотность смеси заполнителей P_3 (5) и объем V_{P_3} пустот в 1 м^3 бетонной смеси V_{P_3} (6):

$$V_M = \frac{M_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{M_{\text{д}}}{\rho_{\text{мд}}} + V \quad (4)$$

$$P_3 = 1 - (\rho_{\text{зп}}/\rho_3) \quad (5)$$

$$V_{P_3} = P_3 \cdot (\Pi + \text{Ц})/\rho_{\text{зп}} \quad (6)$$

Коэффициент раздвижки зерен заполнителя цементным тестом:

$$\alpha = V_M/V_{P_3} \quad (7)$$

Оптимальным, с точки зрения повышения диаметра и уменьшения времени расплыва бетонной смеси, считается [1] коэффициент раздвижки зерен 1,2...1,4. В случае необходимости увеличения коэффициента α при заданном количестве цемента увеличивается количество наполнителя (одновременно уменьшается объем смеси крупного и мелкого заполнителя).

ЛИТЕРАТУРА

1. Szwabowski J., Gołaszewski J. Technologia betonu samozagęszczalnego. Polski Cement, 2010. 160 s.
2. The European Guidelines for Self Compacting Concrete, EFNARC, Specification, Production and Use, 2005. www.efnarc.org
3. Okamura H., Ozawa K. Mix Design for Self-Compacting Concrete // Concrete Library of JSCE, – No. 25. – 1995.
4. Пути создания самоуплотняющихся бетонов // С.В. Коваль, Д.М. Поляков, М. Циак, М. Ситарски. – К.: НДІБК, 2009. – Вип. 72. – С. 232–238.