Строительные материалы и изделия

УДК 694

© Д. А. Ахметов, д-р техн. наук, доцент, ген. директор
(ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ», Алматы, Казахстан)

E-mail: dan-akhmetov@yandex.kz

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tsik54@yandex.ru

© Е. Н. Рот, магистр строительства, проектный
менеджер

(ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ», Алматы, Казахстан)

E-mail: project_manager@niistrom.kz

© С. Б. Ахажанов, PhD строительства, доцент
(Карагандинский университет

им. академика Е. А. Букетова, Караганда, Казахстан)

E-mail: stjg@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-5-102-108

© D. A. Akhmetov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor,
General Director

(NIISTROMPROJECT LLP, Almaty, Kazakhstan)

E-mail: dan-khmetov@yandex.kz

© Yu. V. Pukharensko, Dr. Sci. Tech., Professor,
Corresponding Member of RAACS

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: tsik54@yandex.ru

© Ye. N. Root, Master of Construction, Project Manager
(NIISTROMPROJECT LLP, Almaty, Kazakhstan)

E-mail: project_manager@niistrom.kz

© S. B. Akhazhanov, PhD of Construction, Associate Professor
(Karaganda University of the Academician E. A. Buketov,

Karaganda, Kazakhstan)

E-mail: stjg@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ И НИЗКОМОДУЛЬНОГО ФИБРОВОЛОКНА НА УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

THE EFFECT OF FINE AGGREGATES PRODUCED FROM ANTHROPOGENIC WASTE AND LOW-MODULUS FIBER ON THE WORKABILITY OF SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC)

В статье приводятся исследования перспективного материала в строительной индустрии Республики Казахстан — самоуплотняющегося бетона (СУБ). Исследовались такие важные физико-технические параметры, как удобоукладываемость, сохраняемость и набор прочности в ранние сроки твердения. Полученные данные показаны в сводных таблицах, приведена математическая модель, сделаны обобщающие выводы.

Ключевые слова: самоуплотняющиеся бетоны, набор прочности, фиброармирование.

This article gives information about the research of the new promising material in construction industry of the Republic of Kazakhstan, namely, self-compacting concrete (SCC). We have studied such important physical and technical properties as workability, durability, gain in strength in the early stages of concrete hardening. The data obtained are presented in summary tables, a mathematical model is given, generalizing conclusions are made.

Keywords: self-compacting concretes, gain in strength, fiber-reinforcement.

Современное строительство требует разнообразных строительных материалов с различными физико-техническими и эксплуатационными свойствами. Большие надежды связаны с совер-

шенствованием технологии самоуплотняющихся бетонов (СУБ) — материала, который в скором будущем найдет широкое применение в строительной индустрии Республики Казахстан [1].

В последние годы в строительной практике за рубежом при изготовлении бетонов нового поколения все больше применяют СУБ, представляющие собой материал, который способен уплотняться под действием собственного веса, заполняя форму даже в густоармированных конструкциях (ГОСТ 25192–2012¹). Этот вид тяжелого бетона имеет большое будущее в монолитном строительстве, производстве сборного железобетона, для усиления бетонных и железобетонных конструкций различного назначения, так как его применение позволяет отказаться от традиционной укладки бетона с виброуплотнением, оптимизировать трудозатраты и улучшить санитарно-гигиенические условия труда. Использование таких бетонов практически снимает проблему преждевременного истощения эксплуатационного ресурса железобетонных конструкций, что нередко имеет место в строительной индустрии [2].

Также при использовании СУБ уменьшается вредное шумовое воздействие на окружающую среду, что позволяет производить бетонные работы в густонаселенных городских районах в ночное время.

Однако такое резкое отличие СУБ от традиционных классических тяжелых бетонов с заданными физико-техническими свойствами ставит перед исследователями в области бетоноведения ряд серьезных задач, требующих системного и ступенчатого подхода к прогнозированию свойств СУБ, описанию реологических свойств литых бетонных смесей, оптимального распределения заполнителей в бетонной матрице, а также зависимостей, оценивающих влияние мелкодисперсных наполнителей на характеристики самоуплотняющихся смесей. Системный подход позволит прогнозировать и направленно регулировать свойства СУБ в зависимости от задач, поставленных перед исследователями [3].

По мнению профессора В. И. Калашникова [4], при проектировании составов СУБ необходимо обеспечить ряд условий, таких как высокая подвижность бетонной смеси (расплыв конуса 65–75 см), исключение ее расслаиваемости, достижение прочностных характеристик. Эти задачи можно решить, например, обеспечив высо-

кую раздвижку зерен мелкого и крупного заполнителя. Однако при этом нельзя вводить дополнительный пластификатор, при котором бетонная смесь расслоится. Зато добавление тонкодисперсного наполнителя дает нужный результат, не приводя к уменьшению прочности по сравнению с обычным бетоном из-за снижения водоцементного отношения. Еще один перспективный способ улучшения физико-технических и эксплуатационных характеристик бетонов — добавление полимерной низкомолекулярной фибры, которая повышает прочность на сжатие и растяжение при изгибе, трещиностойкость в процессе усадки, а также улучшает другие характеристики цементных стройматериалов. Полипропиленовое волокно рекомендуется применять в составе бетонов для уменьшения расслоения смесей, улучшения водонепроницаемости, морозостойкости, коррозионной стойкости, ударной прочности, истираемости. Кроме того, полипропиленовое волокно отличается стойкостью в щелочной среде и не корродирует в среде цементного бетона с $\text{pH} > 12$. Армирование полипропиленовым волокном делает поверхность бетона более твердой, повышает общую водостойкость, получаемый композит становится устойчивым ко многим химическим соединениям.

При выборе данного вида фибры для исследований принимали во внимание и экономический аспект, учитывая, что необходимое для армирования бетона количество полимерной фибры гораздо дешевле, чем металлическая или какая-либо другая фибра того же объема.

Целью работы являлось исследование влияния тонкодисперсных микронаполнителей и полипропиленового фиброволокна на физико-технические свойства СУБ.

Перед исследователями ставились следующие задачи:

- получение бетонной смеси с высокой степенью подвижности, сохраняющейся более двух часов;
- подбор наиболее эффективного микронаполнителя для СУБ;
- определение влияния размера и количества полипропиленовой фибры на показатели по удобоукладываемости.

Исследования проводились в научно-исследовательской лаборатории КНИЛСМ ТОО

¹ ГОСТ 25192–2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. М., 2013.

«НИИСТРОМПРОЕКТ» (Алматы), опытную партию СУБ класса В30 объемом 8 м³ выпустили на предприятии по производству ЖБИ и товарного бетона ТОО «ТЕМІРБЕТОН-1» (Алматы).

В работе использовали:

- цемент ПЦ 400-Д20 производства ТОО «Цементный завод Семей» (ГОСТ 10178–85²);
- гиперпластификатор EZCON (AR-122) производства KG Kazakhstan, Астана (ГОСТ 24211–2008³, ГОСТ 30459–2008⁴);
- щебень фракции 5–20 мм производства ТОО «Кен-тас», Алматинская область (ГОСТ 8267–93⁵);
- песок $M_{кр} = 2,6$ производства ТОО «Марк», Алматинская область (ГОСТ 8736–2014⁶, ГОСТ 8735–88⁷);
- микрокремнезем МК-85 производства «Тау-Кен Темир», Караганда;
- шлак РФХ Актюбинского завода ферросплавов;
- золу-унос Алматинской ТЭЦ-1;
- низко модульное полипропиленовое волокно различной длины ООО «ФиброЛюкс»

² ГОСТ 10178–85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. М., 1987.

³ ГОСТ 24211–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. М., 2010.

⁴ ГОСТ 30459–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. М., 2010.

⁵ ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. М., 2014.

⁶ ГОСТ 8736–2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М., 2015.

⁷ ГОСТ 8735–88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. М., 2018.

(Санкт-Петербург) с характеристиками, указанными в табл. 1.

Комплексная научно-исследовательская лаборатория строительных материалов ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» проводила оптимизацию состава бетона класса В30 с применением различных мелкодисперсных наполнителей, подбираемых расчетно-экспериментальным методом с проведением пробных замесов (ГОСТ 10181–2014⁸). Сравнительные характеристики полученных составов бетонной смеси и бетона приведены в табл. 2–4.

Целью эксперимента было получение СУБ с одинаковым распылом конуса для определения различий в необходимом количестве содержания сырьевых материалов, а также прочностных характеристик бетона в ранние сроки твердения (для определения возможности производства распалубки) и сохраняемости бетонной смеси различных составов. Далее планировалось вводить в полученный состав полипропиленовое фиброволокно и для определить влияние его размеров и количества на удобоукладываемость СУБ оптимального состава.

Для определения распыла конуса используется стандартный конус Абрамса. Конус и металлический лист смачиваются, затем конус устанавливается на металлический лист меньшим основанием к поверхности листа. Бетонная смесь заливается до полного заполнения конуса в один

⁸ ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. М., 2015.

Таблица 1

Технические характеристики полипропиленового волокна

Наименование показателя	Нормативное значение	Фактическое значение
Материал	Полипропилен	Полипропилен
Тип	Моноволокно	Моноволокно
Длина волокна	6–15 мм	Соответствует
Диаметр волокна	18–21 мкм	20 мкм
Форма	Круглая	Круглая
Поверхность	Обработана специальным составом, способствующим рассеиванию и сцеплению с цементным раствором	Обработана Silastol CUT 70
Плотность	0,91 г/см ³	0,91 г/см ³
Частотность волокна	19,8 млн/кг	Соответствует
Прочность на растяжение (средняя)	320–600 МПа	Соответствует
Модуль Юнга	3500–3900 МПа	Соответствует
Цвет	Белый	Белый

Таблица 2

Составы бетонной смеси СУБ, кг/м³

Наименование компонента	Расход компонентов в составах №				
	1	2	3	4	5
Цемент	385	385	495	459	477
Микрокремнезем	0	0	55	51	53
Зола-унос	0	165	0	0	0
Шлак	165	0	0	0	0
Вода	170	190	165	160	160
Песок	960	721	999	1043	947
Щебень, 5–10 мм	438	585	468	472	489
Щебень, 10–15 мм	292	315	252	328	326
Добавка	6,5	6,5	6,5	5,3	5,9

Таблица 3

Распływ конуса и сохраняемость бетонной смеси различных составов

Время после приготовления бетонной смеси, мин	Распływ конуса, см, бетонной смеси состава №				
	1	2	3	4	5
0	74	74	74	74	74
15	74	72	74	72	73
30	74	71	74	72	73
60	74	68	74	71	72
120	73	65	73	70	71

Таблица 4

Прочность бетона в возрасте трех суток, МПа

Номер состава				
1	2	3	4	5
35,81	19,79	41,21	36,85	38,14

прием. Производится подъем конуса в течение 5–7 с, и после полной остановки смеси замеряются два наибольших диаметра расплыва. Среднее арифметическое значение двух наибольших диаметров расплыва является результатом испытания. Согласно ERMCO-2005⁹, СУБ по показателю удобоукладываемости подразделяется на три класса (табл. 5).

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- смесь состава № 2 с включением золы-уноса имеет наибольшую водопотребность, что сказыв-

⁹ ERMCO. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. May 2005.

Таблица 5

Классификация СУБ по показателю удобоукладываемости

Класс	Распływ конуса, мм
SF 1	550–650
SF 2	660–750
SF 3	760–850

вается на прочностных характеристиках бетона (наименьшая прочность из представленных составов), с течением времени происходит снижение сохраняемости смеси;

- наивысший показатель по прочностным характеристикам показывает состав № 3 с включением микрокремнезема и наибольшим содержанием цемента, однако данный расход никак не влияет на сохраняемость смеси.

Таким образом, шлак и микрокремнезем считаются приемлемыми для использования. Однако для получения высоких прочностных характеристик СУБ следует использовать именно микрокремнезем [5]. Учитывая это, в рамках дальнейшего исследования удобоукладываемости бетонной смеси за контрольный был принят экспериментально подобранный состав СУБ класса В30 (табл. 6).

Испытания проводились начиная с определения расплыва конуса смеси контрольного состава. При каждом последующем испытании в смесь вводилась низкомолекулярная полипропиленовая фибра длиной 6, 9, 12 или 15 мм и расходом 0,5 кг на 1 м³. Предельное содержание фибры в смеси составляло 2 кг на 1 м³, так как согласно [6] дальнейшее увеличение ее количества приводит к резкому снижению физико-технических характеристик смеси, поэтому технически нецелесообразно и экономически невыгодно. Испытуемые составы смесей и результаты испытаний отражены в табл. 7 и 8.

В результате обработки данных получена модель зависимости удобоукладываемости СУБ (Y_3) от длины (X_1) и количества (X_2) фибры в составе смеси в виде уравнения регрессии:

$$Y_3 = 60,643 - 1,616X_2 + 26,25X_1^2 + 26,06X_2^2.$$

При построении модели для наглядности данных количество фибры пересчитывалось в процентах от массы цемента. Графическое изображение модели представлено на рисунке.

Таблица 6

Состав СУБ (контрольный), кг/м³

В/Ц	Цемент	Песок	Щебень, 5–10 мм	Щебень, 10–15 мм	Добавка	Микрокремнезем
0,34	495	999	468	252	6,5	55

Результаты проведенных испытаний, отраженные в математической модели, показывают общую картину снижения показателей удобоукладываемости фиброармированных смесей по сравнению с контрольным составом, что согласуется с [6]. Тем не менее, получены составы СУБ, армированные волокнами длиной 6 мм в количестве до 1 кг на 1 м³, соответствующие по удобоукладываемости классу SF 2, что свидетельствует о возможности применения данного состава в густоармированных конструкциях сложной геометрической формы. Остальные смеси с волокнами длиной более 6 мм при содержании до 2 кг на 1 м³ имеют показатели удобоукладываемости, соответствующие классу SF 1, и также могут быть рекомендованы к применению как СУБ (EFNARC 2002¹⁰). При этом предложенная математическая модель позволяет прогнозировать критическое

¹⁰ EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. February 2002. 32 p.

содержание разноразмерного низкомолекулярного волокна, после которого бетонная смесь перестает быть самоуплотняющейся.

При использовании шлака в качестве микронаполнителя есть возможность получения СУБ необходимой удобоукладываемости при В/Ц = 0,41, с удовлетворительной сохраняемостью и набором довольно высокой прочности в ранние сроки твердения.

При использовании золы-уноса результаты испытаний сравнительно хуже: наблюдается уменьшение расплыва конуса во времени, несмотря на высокое В/Ц = 0,49; прочность композита в ранние сроки твердения значительно ниже других исследуемых составов.

При введении в составы различного содержания микрокремнезема наилучшими характеристиками обладает бетонная смесь и бетон с расходом микрокремнезема в количестве 55 кг/м³.

Таблица 7

Тестируемые составы СУБ

Вариант армирования	Расход компонентов, кг/м ³							
	Цемент	Песок	Щебень 5–10 мм	Щебень 10–15 мм	Добавка	Микрокремнезем	Фибра	Вода
Контрольный состав без фибры	495	999	468	252	6,5	55	0	260
Фибра 6 мм, расход 0,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	0,5	260
Фибра 6 мм, расход 1 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	1	260
Фибра 6 мм, расход 1,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	1,5	260
Фибра 6 мм, расход 2 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	2	260
Фибра 9 мм, расход 0,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	0,5	260
Фибра 9 мм, расход 1 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	55	1	260
Фибра 9 мм, расход 1,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	1,5	260
Фибра 9 мм, расход 2 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	2	260
Фибра 12 мм, расход 0,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	0,5	260
Фибра 12 мм, расход 1 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	1	260
Фибра 12 мм, расход 1,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	1,5	260
Фибра 12 мм, расход 2 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	2	260
Фибра 15 мм, расход 0,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	0,5	260
Фибра 15 мм, расход 1 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	1	260
Фибра 15 мм, расход 1,5 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	1,5	260
Фибра 15 мм, расход 2 кг/м ³	495	999	468	252	6,5	54	2	260

Таблица 8

Зависимость расплыва конуса от расхода и длины фибры

Вариант армирования	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Расплыв смеси, см
Контрольный состав без фибры	2395	70
Фибра 6 мм, расход 0,5 кг/м ³	2402	67
Фибра 6 мм, расход 1 кг/м ³	2299	65
Фибра 6 мм, расход 1,5 кг/м ³	2268	63
Фибра 6 мм, расход 2 кг/м ³	2249	60
Фибра 9 мм, расход 0,5 кг/м ³	2320	64
Фибра 9 мм, расход 1 кг/м ³	2294	62
Фибра 9 мм, расход 1,5 кг/м ³	2280	60
Фибра 9 мм, расход 2 кг/м ³	2253	57
Фибра 12 мм, расход 0,5 кг/м ³	2351	63
Фибра 12 мм, расход 1 кг/м ³	2343	60
Фибра 12 мм, расход 1,5 кг/м ³	2298	58
Фибра 12 мм, расход 2 кг/м ³	2278	57
Фибра 15 мм, расход 0,5 кг/м ³	2351	62
Фибра 15 мм, расход 1 кг/м ³	2328	60
Фибра 15 мм, расход 1,5 кг/м ³	2315	59
Фибра 15 мм, расход 2 кг/м ³	2310	57

Данный состав имеет наивысшие прочностные характеристики в возрасте трех суток, а также удовлетворительную сохраняемость смеси при В/Ц = 0,34.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено влияние параметров фибрового армирования на удобоукладывае-

мость самоуплотняющегося бетона, предложена математическая модель, характеризующая изменение реологических свойств высокопластичных бетонных смесей от размера и количества низко модульного полипропиленового фиброволокна с учетом возможности практического применения.

Математическая модель зависимости расплыва смеси от параметров армирования

Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08857436).

Библиографический список

1. Akhmetov D., Aniskin A., Utepov Ye., Root Ye., Kozina G. Determination of Optimal Fibre Reinforcement Parameters for Self-Compacting Concretes // *Tehnički vjesnik*. 2020. Vol. 27. № 6. Pp. 1982–1989.
2. Ахметов Д. А., Рот Е. Н., Ермуханбет М. А. Влияние различных типов химических добавок на удобоукладываемость бетонной смеси и прочность конечного конгломерата // материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, посв. памяти профессора В. И. Калашникова. Пенза, 16–18 октября 2018 г. Пенза, 2018. С. 3–6.
3. Матвеев Д. В., Иванов И. М., Черных Т. И., Крамар Л. Я. Разработка составов и исследование свойств самоуплотняющихся бетонов на рядовых материалах Челябинской области // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. 2016. Т. 16. № 3. С. 55–59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sostavov-i-issledovanie-svoystv-samouplotnyayushchikhsya-betonov-na-ryadovykh-materialah-chelyabinskoy-oblasti> (дата обращения: 10.08.2020).
4. Калашников В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
5. Nagarathnam B. H., Mannan M. A., Rahman M. E., Mirasa A. K., Richardson A., Nabinejad O. Strength and microstructural characteristics of palm oil fuel ash and fly ash as binary and ternary blends in Self-Compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 202. Pp. 103–120.
6. Казанцев А. В., Николаева Е. Н. Влияние фибрового армирования на свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона // Молодой ученый. 2018. № 17 (203). С. 56–58.

References

1. Akhmetov D., et al. Determination of Optimal Fibre Reinforcement Parameters for Self-Compacting Concretes. *Tehnički vjesnik*, 2020, vol. 27, no. 6, pp. 1982–1989.
2. Akhmetov D. A., Root E. N., Ermukhanbet M. A. Vliyanie razlichnykh tipov khimicheskikh dobavok na udoboukladyvaemost' betonnoy smesi i prochnost' konechnogo konglomerata [The influence of various types of chemical additives on the workability of the concrete mixture and the strength of the final conglomerate]. *Trudy XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh, posvyashchennoy pamyati professora V. I. Kalashnikova* [Proceedings of the International scientific-technical conference of young scientists dedicated to the memory of Professor V. I. Kalashnikov]. Penza, October 16–18, 2018, pp. 3–6.
3. Matveev D. V., Ivanov I. M., Chernykh T. I., Kramar L. Ya. Razrabotka sostavov i issledovanie svoystv samouplotnyayushchikhsya betonov na ryadovykh materialakh Chelyabinskoy oblasti [Development of composition and investigation of properties of self-compacting concrete from ordinary materials of the Chelyabinsk region]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta – Bulletin of the South Ural State University*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 55–59. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sostavov-i-issledovanie-svoystv-samouplotnyayushchikhsya-betonov-na-ryadovykh-materialah-chelyabinskoy-oblasti> (accessed: 10.08.2020).
4. Kalashnikov V. I. Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchikhsya betonov [Calculation of composition of high-strength self-compacting concrete]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2008, no. 10, pp. 4–6.
5. Nagarathnam B. H., et al. Strength and micro-structural characteristics of palm oil fuel ash and fly ash as binary and ternary blends in Self-Compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 202, pp. 103–120.
6. Kazantsev A. V., Nikolaeva E. N. Vliyanie fibrovogo armirovaniya na svoystva samouplotnyayushchikhsya betonnoy smesi i betona [The effect of fiber reinforcement on the properties of self-compacting concrete mix and concrete]. *Molodoy ucheniy – Young Scientist*, 2018, no. 17 (203), pp. 56–58.