УДК 691

© Е. Б. Утепов, д-р техн. наук, доцент
(Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева)
E-mail: utepov-elbek@mail.ru
© Д. А. Ахметов, д-р техн. наук, ген. директор
© Е. Н. Рот, магистр техн. наук, менеджер проектов
© М. А. Ермуханбет, магистр техн. наук,
старший инженер лаборатории
(ОО «НИИСТРОМПРОЕКТ»)
E-mail: dan-akhmetov@yandex.kz, project_manager@niistrom.kz,
ermuhanbetmiras@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-220-227

© Ye. B. Uteпов, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(L. N. Gumilyov Eurasian National University)
E-mail: utepov-elbek@mail.ru
© D. A. Akhmetov, Dr. Sci. Tech., General Director
© Ye. N. Root, Master in Sci. Tech., project manager
© M. A. Yermuhanbet, Master in Sci. Tech., senior
engineer of the laboratory
(«NIISTROMPROJECT» LLP)
E-mail: dan-akhmetov@yandex.kz, project_manager@
niistrom.kz, ermuhanbetmiras@gmail.com

АРМИРОВАНИЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫМ ФИБРОВОЛОКНОМ¹

REINFORCEMENT OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBER

Рассмотрены дефекты строительных конструкций, наиболее распространенные на строительных площадках исследуемого региона, и методы, позволяющие предупредить возникновение таких дефектов. Одним из таких методов является применение самоуплотняющихся бетонов, армированных фиброволокном. Показаны результаты исследований самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона, влияние полимерных волокон на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и конечного конгломерата. Проведены лабораторные испытания и сделаны выводы об оптимальном содержании фибры в составах самоуплотняющегося бетона. Приведены результаты определения прочности на сжатие, изгиб, а также влияние содержания фиброволокна на усадочные деформации.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, фиброармирование, фиброволокно.

The article presents an overview of the building structures' defects, widespread at the sites of the researched region construction, as well as the methods that allow preventing such defects' emergence. One of these methods is usage of self-compacting concretes reinforced with fiber. The research results of self-compacting concrete (SCC) mix and concrete researches, polymeric fiber impact on SCC mixes and final product properties are submitted. Laboratory tests were carried out, which permitted coming to conclusions on optimal fiber content in SCC mixes. The results of compressive strength tests and bending tensile tests, as well as the impact of fiber proportions on shrinking deformation are described.

Keywords: self-compacting concrete (SCC), fiber-reinforcement, fiber.

Большой опыт, накопленный сотрудниками Алматинского ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» за несколько лет инспекционных работ на строительных площадках и заводах по производству ЖБИ, а также систематические исследования и испытания изделий и конструкций в процес-

се эксплуатации показывают, что очень важно не только обеспечить заданные свойства бетона, но и сохранить их в течение всего периода эксплуатации здания или конструкции. Как указано в [1], развитие науки о бетоне и технологии сборного и монолитного железобетона позволило существенно повысить долговечность бетона, улучшить его качество, спрогнозировать поведение бетона в конструкциях при воздействии различных факторов. Появилась реальная возможность обеспечения длительной стабильности свойств материала в процессе эксплуатации. Внедрение высокопрочных быстротвердеющих бетонов по-

¹ Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2018–2020 гг. по приоритету «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геология, переработка, новые материалы и технологии, безопасные изделия и конструкции» проекта № AP05131685 «Разработка технологического регламента по производству самоуплотняющегося бетона на местных материалах с использованием техногенных отходов и гиперпластификаторов на основе поликарбоксилатов последнего поколения Казахстанского производства».

звolyет разработать новые конструктивные элементы и технологии, значительно расширить номенклатуру бетонных изделий и конструкций.

Однако, наряду с явным прогрессом в строительном материаловедении и нынешнем материально-техническом оснащении строительных площадок, имеют место нарушения, допускаемые как производителями на бетонных заводах, так и строителями при производстве монолитного бетонирования на объектах. Например, такие нарушения производства бетонных работ, как:

- недостаточное или неправильное уплотнение бетонной смеси при укладке в опалубку, вследствие чего образуются сколы и раковины в теле бетона (рис. 1);
- расслоение бетонной смеси вследствие неправильного подбора состава бетона, использования заполнителей и химических добавок низкого качества, отсутствия должного поэтапного лабораторного контроля (рис. 2);

- возникновение трещин, выбоин и углублений в бетоне (рис. 3), связанных с нарушениями технологии строительства и уходом за бетоном в летний период (при температуре окружающей среды от 30 до 45 °С);

- разрушение бетона по краям, на срезах и выступах (рис. 4) вследствие неверного ухода за бетоном в ранние сроки твердения при низких температурах в зимний период.

Одним из способов, позволяющих решить некоторые из вышеперечисленных проблем, является применение самоуплотняющихся бетонов с высокой кинетикой набора прочности в ранние сроки твердения и низкими усадочными деформациями. Самоуплотняющийся бетон находит все более широкое применение в Республике Казахстан. В [2] говорится, что пока этот бетон применяется в основном при монолитном строительстве. Два завода г. Алматы освоили его выпуск, применяя технологический регламент и составы, разработанные алматинским ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» специально под каждое

Рис. 1. Недостаточное или неправильное уплотнение бетонной смеси

Рис. 2. Расслоение бетонной смеси

Рис. 3. Неправильный уход в летнее время

Рис. 4. Неправильный уход в зимнее время

конкретное предприятие, с учетом технических параметров бетоносмесительных установок, весодозировочного оборудования, используемого вяжущего, мелкодисперсного наполнителя, качества применяемых заполнителей и химических добавок. Также перспективным является его дальнейшее использование для производства сборного железобетона, устройства монолитных высокопрочных бесшовных полов, торкретбетонирования, реставрации и усиления конструкций. Однако из [3] следует, что использование этого материала для вышеуказанных целей имеет определенные трудности, связанные прежде всего с высокой удобоукладываемостью этих бетонов. Согласно The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use², самоуплотняющийся бетон (СУБ) по показателю удобоукладываемости классифицируется на три класса (табл. 1).

² The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. United Kingdom: EFNARC, 2005. P. 17.

В связи с реологическими особенностями самоуплотняющихся бетонов (цементное тесто должно иметь необходимые тиксотропные свойства (рис. 5)), чтобы поддерживать в подвешенном состоянии конкретный набор зерен заполнителя, должно быть обеспечено условие отсутствия сегрегации: статический предел текучести больше минимального статического предела текучести (рис. 6).

Очень важно выдерживать оптимальное объемное количество цементного теста, в котором количество воды будет обеспечивать именно ту

Таблица 1

**Классификация СУБ по показателю
удобоукладываемости**

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

Рис. 5. Кривая течения СУБ

пластическую вязкость, при которой достигается необходимый предел текучести для заданного бетона с целью исключить риски блокировки (прохождения через препятствия) и дефекты поверхности изделий [4].

На данный момент нормативной базой и застройщиками проводится планомерное повышение требований к качеству, физико-механическим, эксплуатационным свойствам зданий и сооружений. С учетом вышеуказанных технологических особенностей СУБ в настоящее время у заводов-производителей самоуплотняющихся и товарных бетонов возникла необходимость более эффективного повышения качественных характеристик выпускаемой продукции. По этой причине промышленные предприятия строительной отрасли обратились в алматинский «НИИСТРОМПРОЕКТ» с заявкой на разработку составов самоуплотняющихся бетонов, которые будут отвечать всем требованиям нормативной документации и застройщиков.

Одним из способов повышения деформационных свойств бетона является объемное армирование с применением фиброволокна. Изучив накопленный опыт ученых других государств, инженеры ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» ре-

Рис. 6. Условие отсутствия сегрегации

шили провести лабораторные испытания самоуплотняющихся бетонов с фиброармированием.

Исследования дисперсно-армированных бетонов из высокоподвижных или самоуплотняющихся смесей ранее проводились и в России, и на территории Германии [5]. В этих работах отмечалось, что фиброволокно, добавленное в бетонную смесь, распределяется в ней во время перемешивания, оптимизирует внутреннюю структуру цементного камня, в результате чего бетон становится более прочным, долговечным и с высокими эксплуатационными свойствами. На данные показатели свойств фибробетона основное влияние оказывают характеристики качества составляющих его исходных материалов, в том числе фибры. Из [6] следует, что для получения фибробетона с высокими эксплуатационными свойствами и долговечностью необходимо достичь технологической совместимости фибры и цементного камня, т. е. фибра должна быть равномерно распределена в оптимальном количестве в растворной части бетона, а фибробетонная смесь должна иметь достаточную удобоукладываемость, соответствовать технологии производства изделий и конструкций.

Для этих целей нами было выбрано полипропиленовое фиброволокно (табл. 2) по следующим причинам: инертно в кислотной и щелочной среде, имеет низкую стоимость, имеет большое количество волокон в единице объема. В связи с этим, несмотря на пониженную прочность на растяжение и анкерную способность полипропиленового волокна, при рассмотрении технико-экономических показателей применения полипропиленовое волокно имеет необходимое соотношение «результат — стоимость». Кроме того, из всех широко применяемых волокон полипропиленовое волокно не создает проблем в применении, может быть добавлено на любой стадии приготовления фибробетона, не подвержено комкованию и коррозии [6].

Задача, поставленная заводами-производителями самоуплотняющегося бетона, заключается в необходимости провести исследование основных свойств самоуплотняющегося фибробетона класса В40 с использованием полипропиленовой фибры. В качестве контрольного состава был выбран уже действующий на заводах состав СУБ В40 без использования фиброволокна (табл. 3).

Таблица 2

**Физические свойства образца
фиброволокна**

Характеристика	Значение
Материал	Витые полиолефины с чистым покрытием
Форма	Фибриллированный
Объемная плотность	0,91 кг/дм ³
Длина	18 мм, допустимое отклонение $\pm 1,5$ мм
Цвет	Бежевый
Устойчивость к кислотам/щелочам	Инертный
Предел прочности	400 Н/мм ²
Модуль упругости	4900 Н/мм ²
Точка размягчения	150 °С
Толщина фольги	80 мкм

Для выполнения поставленных задач необходимо было определить оптимальное содержание фиброволокна в составе самоуплотняющейся смеси. Введение дополнительного компонента приводит к повышению водопотребления смеси вследствие увеличения суммарной удельной поверхности. В связи с этим первостепенной задачей является нахождение нужного количества воды, которое обеспечит необходимые реологические свойства самоуплотняющейся смеси, но при этом не будет плохо влиять на физико-механические и эксплуатационные свойства конечного конгломерата. Ниже представлен график, отражающий результаты испытаний по

определению расплыва конуса самоуплотняющихся смесей вышеуказанных составов (рис. 7).

По результатам ранее проведенных исследований ТОО «НИИСТРОМПРОЕКТ» было установлено, что оптимальным расплывом конуса смеси как для производства монолитных работ, так и при производстве ЖБИ, является расплыв в диапазоне от 65 до 70 см [2]. В связи с этим можно сделать вывод, что составы № 1–5 имеют необходимый расплыв конуса.

В связи с принципиально различными свойствами бетонных смесей стандартных тяжелых бетонов и самоуплотняющихся, основополагающее значение для СУБ имеет такой показатель, как текучесть. В процессе исследований также было изучено влияние вводимого количества фибры на данный показатель. Ниже представлен график, отражающий результаты испытаний по определению текучести самоуплотняющихся смесей вышеуказанных составов (рис. 8).

Текучесть самоуплотняющегося бетона при формовке изделий будет влиять на ее прохождение через препятствия, способность полностью заполнить форму. Приемлемой является текучесть не выше 40 с. Использование смесей с текучестью выше 40 с приведет к тому, что смесь ввиду высокой вязкости потеряет способность к течению, будет залипать на стенках насосных установок при перекачивании. Поэтому использование таких смесей неприемлемо с эксплуатационной точки зрения. В связи с этим можно сделать вывод, что составы № 1–4 имеют необходимый показатель текучести и расплыва конуса и могут быть рассмотрены по другим характеристикам.

Таблица 3

Исследуемые составы

Наименование сырьевых материалов	Контрольный состав	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Цемент, кг	540	540	540	540	540	540	540	540	540
Песок, кг	944	944	944	944	944	944	944	944	944
Щебень (5–10), кг	625	625	625	625	625	625	625	625	625
Щебень (10–20), кг	175	175	175	175	175	175	175	175	175
Микрокремнезем, кг	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Фибра (18 мм), кг	–	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0
Добавка (№ 9–2), кг	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)	6,5 (1,3 %)
Вода, кг	205	215	225	225	235	240	245	250	250

Рис. 7. График зависимости распыла конуса от содержания фибры

Было проведено исследование влияния количества введенного волокна на свойства не только бетонной смеси, но и конечного конгломерата.

По результатам данных испытаний (рис. 9) можно сделать вывод, что по показателю прочности при сжатии все исследуемые составы соответствуют классу бетона В40 с запасом прочности.

Также одним из основных показателей бетона и искомой характеристикой при выполнении исследований является прочность при изгибе (рис. 10), так как основная цель введения фиброволокна — повышение характеристик бетона при изгибающих нагрузках.

По результатам этого испытания состав № 4 показал наивысший показатель. Также по результатам вышеописанных испытаний данный состав удовлетворяет остальным требованиям.

Заключительным испытанием было определение усадочных деформаций (рис. 11). Одной из частых вышеуказанных проблем, встречающихся на строительной площадке, является появление усадочных трещин. По причине того, что СУБ является специфическим бетоном с повышенным объемным содержанием цементного теста, необходимо доказать, что этот факт не повлияет на повышение риска образования усадочных трещин.

По результатам вышепроведенных испытаний можно заключить следующее:

- введение в состав самоуплотняющихся бетонных смесей фиброволокна повышает устойчивость конгломерата к возникновению усадочных деформаций;
- при применении стандартных отработанных составов СУБ приемлемым и необходимым

Рис. 8. График зависимости текучести от содержания фибры

Рис. 9. График зависимости предела прочности при сжатии от содержания фибры

Рис. 10. График зависимости предела прочности при изгибе от содержания фибры

для повышения физико-механических характеристик бетона минимальным содержанием фибры является расход 2 кг/м^3 . При повышении расхода фибры от $2,5 \text{ кг/м}^3$ и выше снижаются характеристики бетонной смеси;

- приемлемые показатели показывает состав № 4 (с добавлением 2 кг фибры и 235 кг воды).

Резюмируя результаты проведенных испытаний, можно сделать вывод о том, что введение

определенного количества полипропиленового волокна улучшает деформационные характеристики действующих заводских составов СУБ, в частности, повышая прочность при изгибе и уменьшая величину усадочных деформаций. Объемное фиброармирование самоуплотняющихся бетонных смесей может быть рекомендовано к применению в производстве, особенно при ведении работ в летнее время.

Рис. 11. График зависимости усадочных деформаций от содержания фибры

Библиографический список

1. Ахметов Д. А., Жакипбеков Ш. К. Перспективные ячеистые бетоны с использованием модифицирующих добавок и техногенных отходов. Алматы: Salem, 2014. С. 7–8.

2. Ахметов Д. А., Рот Е. Н. Опыт применения самоуплотняющихся бетонов в строительной индустрии Республики Казахстан // Молодой ученый. 2017. № 48 (182). С. 11–14.

3. Ахметов Д. А., Утепов Е. Б., Пак В. Е. Исследование влияния мелкодисперсных наполнителей из техногенных отходов на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов (СУБ) // Вестник АО «КазНИИСА». 2018. № 10. С. 25–28.

4. Храпко М. Самоуплотняющийся бетон // Сб. лекций с конф. International Concrete Conference & Exhibition. 2017. Р. 7.

5. Ambroise J., Rols S., Pera J. Properties of self-leveling concrete reinforced by steel fibers // Proceedings of the 3rd International RILEM Workshop on Reinforced Cement Composites, HPFRCC3, Mainz. 1999. Pp. 9–17.

6. Шишканова В. И., Прокофьева Ю. А. Самоуплотняющиеся фибробетоны для монолитных конструкций // Наука и образование: Новое время. 2019. № 2 (31). С. 99–106.

tekhonennykh otkhodov [Perspective cellular concrete with use of modifying additives and technogenic wastes]. Salem, Almaty, 2014, pp. 7–8.

2. Akhmetov D. A., Root E. N. Opyt primeneniya samouplotnyayushchikhsya betonov v stroitel'noy industrii Respubliki Kazakhstan [Experience of application of self-compacting concretes in the construction industry of the Republic of Kazakhstan]. Mezhdunarodno nauchnyy zhurnal «Molodoy uchenyy» – International scientific journal “Young scientist”, 2017, no. 48, pp. 11–14.

3. Akhmetov D. A., Uteпов E. B., Pak V. E. Issledovanie vliyaniya melkdispersnykh napolniteley iz tekhnogennykh otkhodov na udoboukladyvaemost' samouplotnyayushchikhsya betonov (SUB) [Research of influence of fine fillers from technogenic wastes on workability of self-compacting concretes (SUB)]. VestnikAO KazNIISA – Bulletin of AO KazNIISA, 2018, no. 10, pp. 25–28.

4. Khrapko M. Samouplotnyayushchiysyabeton [Self-compacting concrete]. Coll. works “International Concrete Conference & Exhibition”, 2017, p. 7.

5. Ambroise J., Rols S., Pera J. Properties of self-leveling concrete reinforced by steel fibers. Proceedings of the 3-d International RILEM Workshop on Reinforced Cement Composites, HPFRCC3, Mainz. 1999, pp. 9–17.

6. Shishkanova V. I., Prokof'eva Yu. A. Samouplotnyayushchiesya fibrobetony dlya monolitnykh konstruktsey [Self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures]. Nauka i obrazovanie: Novoe vremya – Science and education: New time, 2019, no. 2 (31), pp. 99–106.

References

1. Akhmetov D. A., Zhakipbekov Sh. K. Perspektivnye betony s ispol'zovaniem modifitsiruyushchikh dobavok i