

## Деформационно-прочностные свойства цементно-зольного бетона с добавкой микрокварца

*М.О. Коровкин, А.В. Петухов, Н.А. Ерошкина, С.М. Саденко*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза*

**Аннотация:** Исследована возможность снижения избыточной для бетонов, используемых в массовом строительстве, прочности самоуплотняющегося высокопрочного цементно-зольного бетона за счет замещения части вяжущего инертной минеральной добавкой – микрокварцем, полученным методом измельчения кварцевого песка. Установлено, что исследованная добавка при дозировке до 30 % не позволяет снизить прочность бетона до значений, характерных для бетонов общестроительного назначения. Экспериментально показано, что замещение части вяжущего микрокварцем незначительно влияет на начальный модуль упругости, но значительно снижает быстроснатекающую ползучесть.

**Ключевые слова:** высокопрочный самоуплотняющийся бетон, цементно-зольное вяжущее, инертная минеральная добавка, микрокварц, прочность, модуль упругости, быстроснатекающая ползучесть.

Основной фактор, обеспечивший прогресс в технологии бетона за последние десятилетия, – разработка и внедрение в практику суперпластификаторов (СП). Применение этих добавок, кардинально снижающих водопотребность цементного теста, позволяет получить высокопрочные и сверхвысокопрочные бетоны на основе пластичных и самоуплотняющихся смесей. Несмотря на повышенные технологические и эксплуатационные характеристики этих бетонов, область их рационального применения невелика – она ограничивается высотными зданиями и уникальными сооружениями.

Управление прочностными свойствами бетонов с высокой дозировкой СП за счет изменения расхода воды малоэффективно, так как в таких бетонных смесях даже небольшое отклонение дозировки воды от оптимальной приводит к расслоению или значительному снижению удобоукладываемости смеси. В связи с этим введение в состав бетонов с СП активных и инертных минеральных добавок (далее ИМД) является основным способом, позволяющим без ухудшения удобоукладываемости и

---

долговечности бетона снизить его избыточную прочность до уровня, необходимого в массовом строительстве.

К числу наиболее эффективных минеральных добавок относятся золы ТЭС, которые содержат компоненты, проявляющие в цементном камне пуццолановые и вяжущие свойства. Кроме того, в золе обычно содержатся и инертные по отношению к продуктам гидратации цемента фазы.

Исследованиями установлено, что даже при использовании композиционных цементов, которые содержат более 50 % золы с добавками СП, могут быть получены высокопрочные бетоны на основе литых и самоуплотняющихся смесей [1 – 5].

С точки зрения производства бетонов с характерными для современного строительства значениями прочностей особый интерес представляет совместное применение ИМД с высокоэффективными химическими и минеральными модификаторами. В качестве ИМД могут использоваться дисперсные фракции отходов камнедробления, измельченные кварцевые и полевошпатовые пески, неактивные шлаки и другие промышленные отходы.

С точки зрения более полного использования потенциала вяжущих наиболее эффективно применение ИМД, имеющих размеры частиц, меньше размера частиц цемента. Такие ИМД уплотняют структуру цементного камня за счет заполнения пустот между частицами цемента более мелкими частицами добавки [6]. В вяжущих с высокой дисперсностью для уплотнения структуры могут использоваться ИМД менее дисперсные, чем цемент.

Сведения о влиянии инертных минеральных добавок на прочность бетона противоречивы. По одним данным [7], замещение 20 % цемента молотым кварцевым песком повышает прочность смешанного цемента, а по другим данным, ИМД снижает прочность уже при дозировке более 8 % [8]. Важным фактором, определяющим эффективность использования ИМД в

---

бетоне, является водовяжущее отношение, при снижении которого негативное влияние инертного компонента смешанного вяжущего на прочность уменьшается [9], что можно объяснить более высокой степенью гидратации вяжущего и более плотной, монолитной структурой цементного камня, которая может быть получена при использовании СП [10].

Исследования влияния добавки микрокварца - кварцевого песка, измельченного до удельной поверхности  $340 \text{ м}^2/\text{кг}$ , на свойства цементно-золяного высокофункционального бетона были проведены на составах, в которых 15 и 30 % объема вяжущего замещалось этим ИМД.

Цементно-золяное вяжущее (далее ЦЗВ) было получено в результате совместного измельчения до удельной поверхности  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$  цемента ЦЕМ I производства ООО «Азия цемент» и золы-уноса Красноярской ТЭЦ-1 при равном соотношении этих компонентов. В состав вяжущего до помола дополнительно вводилось 1,5 % гипсового камня и 2 % СП Фортрайс Стронг. Для приготовления бетона применялись щебень из габбро-диабазы фракции 5-15 мм, отсев его дробления с размером частиц от 1,25 до 5 мм и фракционированный песок с размером зерен менее 1,25 мм. Составы исследованных бетонов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы исследованных бетонов

№ состава	ЦЗВ, $\text{кг}/\text{м}^3$	ИМД, $\text{кг}/\text{м}^3$	Щебень, $\text{кг}/\text{м}^3$	Отсев дробления, $\text{кг}/\text{м}^3$	Песок, $\text{кг}/\text{м}^3$	Вода, $\text{л}/\text{м}^3$
1	540	0	880	328	462	152
2	459	71	880	328	462	152
3	378	143	880	328	462	150

Для исследованных составов определялись удобоукладываемость бетонной смеси, прочность бетона при сжатии через 3 и 28 суток, а также прочность и деформационные характеристики бетона через 1 год хранения во влажностных условиях. Прочность бетона определялась на образцах с

номинальным размером 70×70×70 мм, а модуль упругости – на образцах 70×70×280 мм по ГОСТ 244562-80.

Исследованные бетонные смеси благодаря повышенному расходу СП и вяжущего имели высокую подвижность, которая характеризовалась расплывом конуса бетонной смеси (табл.2). Значения этого показателя позволяют отнести составы 2 и 3 к самоуплотняющимся бетонным смесям, а состав 1 имеет близкий к нижней границе для самоуплотняющихся составов расплыв. Данные в табл. 2 свидетельствуют о том, что добавка измельченного песка значительно повышает удобоукладываемость бетонной смеси.

Таблица 2

Свойства бетона с различной степенью замещения вяжущего на ИМД

№ состава	ИМД, %	Расплыв конуса, см	Прочность, МПа, через			Модуль упругости, ГПа
			3 суток	28 суток	1 год	
1	0	49	59,4	87,8	114,7	43,57
2	15	64	52,9	81,2	105,5	43,74
3	30	72	41,2	73,4	95,7	41,83

Несмотря на значительную долю замещения вяжущего ИМД, прочность исследованных бетонов оставалась достаточно высокой – при замещении 15 % ЦЗВ снижение прочности не превышало 10 %, а при замещении 30 % вяжущего на ИМД отмечалось уменьшение прочности в 1,2-1,4 раза, в зависимости от сроков испытания. Снижение прочности при замещении цемента инертной добавкой несколько ниже, чем можно ожидать исходя из правила аддитивности. Это можно объяснить диффузионным переносом цементирующего вещества и наращиванием его на поверхности микрокварца, постепенным заполнением пространства между частицами цемента и микрокварца. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные об изменении относительной прочности ( $R_{от} = 100 \cdot R_t / R_{28}$ , где  $R_t$  и  $R_{28}$  –

прочность бетона в возрасте  $t$  и 28 сут, МПа, соответственно), которая зависит от содержания микрокварца в смешанном вяжущем только на начальном этапе твердения (рис. 1). Несмотря на снижение негативного влияния ИМД на прочность в более поздние сроки твердения, составы с инертной добавкой не достигают прочностных значений контрольного бездобавочного состава. Прочность исследованных цементно-зольных бетонов, в которых до 30 % вяжущего замещено ИМД, снижается всего на 14 %. Высокие значения прочности, характерные для высокопрочных бетонов, при расходе портландцемента менее  $190 \text{ кг/м}^3$  (состав 3 в табл.1) достигаются за счет предельно низкого водовяжущего отношения при повышенном расходе СП, который вводился в тонкодисперсное вяжущее при его помоле.

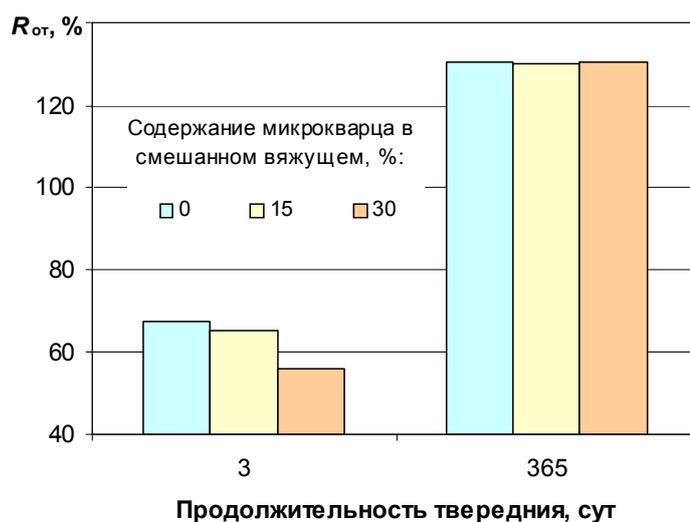


Рис. 1. – Относительная прочность бетона при различном содержании микрокварца в смешанном вяжущем

Несмотря на введение в состав вяжущего 15 % менее деформативного, чем продукты гидратации цемента и золы, микрокварца, начальный модуль упругости бетона остается неизменным, а при увеличении дозировки ИМД до 30 % происходит снижение этой характеристики бетона. Снижение модуля упругости можно предположительно объяснить большей

неупорядоченностью микроструктуры цементно-золяного камня в зоне контакта с поверхностью микрокварца в сравнении со структурой продуктов гидратации цементно-золяного вяжущего. Было установлено, что до уровня нагрузки 40 % от разрушающей во всех исследованных составах не проявляется быстронатекающая ползучесть.

При исследовании деформативности бетона было отмечено, что при увеличении доли микрокварца снижаются значения быстронатекающей ползучести  $\Sigma \varepsilon_n$  при уровне нагрузки 70 % от разрушающей (рис. 2).

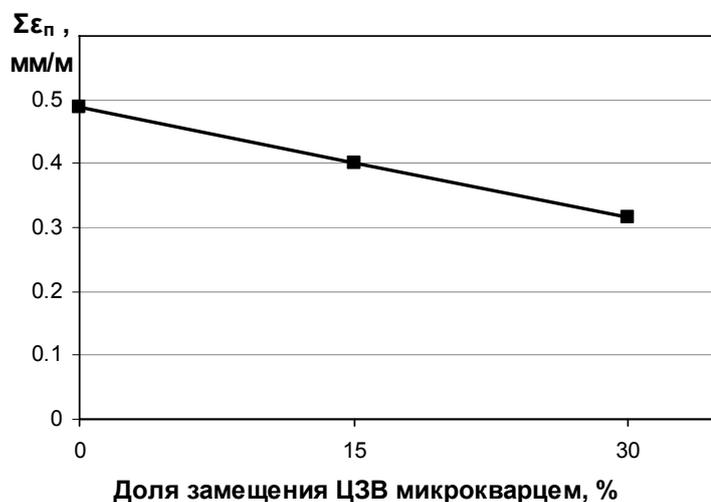


Рис. 2. – Влияние содержания микрокварца в смешанном вяжущем на суммарные деформации быстронатекающей ползучести

Проведенные исследования показали, что использование в качестве инертной минеральной добавки в цементно-золяном вяжущем измельченного кварцевого песка позволяет значительно повысить удобоукладываемость самоуплотняющейся бетонной смеси. Введение до 30 % инертной минеральной добавки в состав цементно-золяного вяжущего, полученного тонким измельчением цемента, высококальциевой золы и суперпластификатора, не позволяет снизить прочность бетона до значений, характерных для бетонов, которые используются в современном массовом

---



строительстве. Для получения таких бетонов на основе исследованного цементно-золяного вяжущего необходима более высокая степень его замещения инертной минеральной добавкой, однако для таких бетонов целесообразно проведение исследований долговечности в связи со значительным снижением клинкера в составе.

### Литература

1. Chung-Ho Huang, Shu-Ken Lin, Chao-Shun Chang, How-Ji Chen. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 46. pp. 71-78.

2. Dinakar P., Reddy M. K., Sharma M. Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash // *Materials and Design*. 2013. Vol. 46. pp. 609-616.

3. Калашников В.И., Тараканов О.В., Белякова Е.А., Мороз М.Н. Новые направления использования зол ТЭЦ в порошково-активированных бетонах нового поколения // *Региональная архитектура и строительство*. 2013. № 3. С. 22-27.

4. Калашников В.И., Белякова Е.А., Тараканов О.В., Москвин Р.Н. Высокоэкономичный композиционный цемент с использованием золы-уноса // *Региональная архитектура и строительство*. 2014. № 1. С. 24-29.

5. Коровкин М.О., Петухов А.В. Высокопрочные бетоны с высоким содержанием золы Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна // *Инженерный вестник Дона*, 2017, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4067/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4067/).

6. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.

7. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // *Инженерный вестник Дона*. 2013. №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562/).

8. Бердов Г.И., Ильина Л.В. Влияние количества и дисперсности минеральных добавок на свойства цементных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 11-12 (623-624). С. 11-16.

9. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Рациональное применение инертных минеральных добавок в технологии бетона // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4361/.

10. Дружинкин С.В., Немыкина Д.А., Краснова Е.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5006.

### References

1. Chung-Ho Huang, Shu-Ken Lin, Chao-Shun Chang, How-Ji Chen. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 46. pp. 71-78.

2. Dinakar P., Reddy M. K., Sharma M. Materials and Design. 2013. Vol. 46. pp. 609-616.

3. Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Moroz M.N. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2013. № 3. pp. 22-27.

4. Kalashnikov V.I., Belyakova E.A., Tarakanov O.V., Moskvina R.N. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2014. № 1. pp. 24-29.

5. Korovkin M.O., Petukhov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4067/.

6. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Technology of concrete]. Moscow: ASV, 2003. 500 p.

7. Kurochka P.N., Gavrillov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1562/.

8. Berdov G.I., Il'ina L.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2010. № 11-12 (623-624). pp. 11-16.



9. Korovkin M.O., Grintsov D.M., Eroshkina N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4361/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4361/).

10. Druzhinkin S.V., Nemykina D.A., Krasnova E.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5006/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5006/).