

УДК 691.5:666.1

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Ильина Л.В., Хакимуллина С.А., Кадоркин Д.А.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, e-mail: nsklika@mail.ru*

Высокая механическая прочность является важнейшим эксплуатационным свойством бетонов. Одним из направлений повышения механических свойств цементных бетонов является использование микродобавок. Для обеспечения высокой эффективности действия этих добавок важны не только их свойства, но и вводимое количество и дисперсность. Следует отметить, что в известных случаях минеральные добавки благоприятно влияют на увеличение прочности, однако количество одной и той же добавки колеблется в очень широких пределах. Одной из чисто механических причин этого мог быть различный средний размер частиц использованных добавок. Чтобы ответить на вопрос, так ли это, необходимо изучить прочность бетона с использованием одного и того же цемента и добавок различной дисперсности и количества. Введение комплексных добавок, состоящих из активной и инертной составляющих, а также изучение их механизма действия представляет научный интерес и является актуальной темой в настоящее время. В связи с этим целью данной работы является модифицирование состава мелкозернистого бетона для увеличения прочности, с применением в качестве модификатора микродисперсных добавок, как активных минеральных (микрокремнезема), так и инертных минеральных (диопсида), и выявление влияния количества и дисперсности добавок, как по отдельности, так и в комплексе. Для ее реализации были решены следующие основные задачи: изучено влияние загрязняющих примесей в песке на прочностные показатели; определены концентрации микрокремнезема для достижения максимального упрочнения; определены концентрации диопсида для достижения максимального упрочнения при заданном размере вводимых частиц; изучено влияние дисперсности вводимых добавок на их количественное содержание для получения наилучших механических показателей; определено оптимальное соотношение указанных двух добавок для достижения максимальных прочностных свойств материала.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, прочность, комплексные добавки, микрокремнезем, диопсид, дисперсность, свойства бетона

INFLUENCE OF DISPERSED MINERAL ADDITIVES STRENGTH FINE CONCRETE

Irina L.V., Khakimullina S.A., Kadorkin D.A.

Novosibirsk State Architectural University (Sibstrin), Novosibirsk, e-mail: nsklika@mail.ru

High mechanical strength is the most important performance properties of concrete. To improve the mechanical properties of the cement concrete is the use of micro additives. To ensure high efficiency of action of these additives are not only their properties, but the addition amount and dispersion. It should be noted that in certain cases, favorably influence mineral supplements to increase the strength, but the number of the same supplements varies widely. One of the purely mechanical reasons for this could be a different average particle size of the additives used. It is therefore necessary to examine the strength of concrete using the same cement and different additives and amounts of dispersion. Introduction of complex additives, consisting of active and inert components, as well as the study of their mechanism of action, is of scientific interest and is a hot topic at the moment. The purpose of this work is the modification of the composition of fine concrete to increase strength, with microdispersed additives as active mineral (microsilica) and inert mineral (diopside) and identifying the number and impact of dispersion additives, either individually or in combination. The effect of impurities in the sand on the strength characteristics: To implement the following major problems have been solved; the concentrations of silica fume for maximum hardening; the concentrations of diopside to achieve maximum hardening at a predetermined amount of particles introduced; the effect of dispersion of additives on their quantitative content; determination of the optimal ratio of these additives.

Keywords: fine-grained concrete, complex additives, strength, microsilica, diopside, dispersion, properties of concrete

Исследуемые материалы и методика измерения прочности

В данной работе использовался портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н. В качестве заполнителя применялся песок ОАО «Камнереченский каменный карьер» с модулем крупности 2,5. В качестве модифицирующих добавок использовались: активная минеральная добавка (микрокремнезем МК-85), инертная минеральная добавка (диопсид), а также их комплексное введение.

На первом этапе изучалось влияние загрязняющих примесей в заполнителе на прочностные показатели. Для этого фор-

мовались две серии образцов на естественном песке и на чистом песке. Прочностные характеристики мелкозернистого бетона определялись при испытании образцов, с размерами 40×40×160 мм после 28 суток твердения в нормальных условиях. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

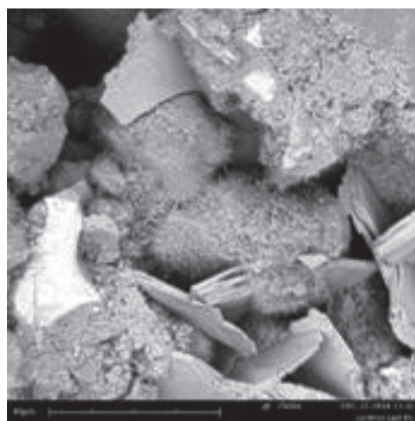
Анализ результатов показал, что при использовании чистого песка прочность на сжатие мелкозернистого бетона увеличивается на 11,9%, возрастает также прочность на изгиб на 6,8%. Поэтому для исключения влияния загрязняющих примесей в заполнителе в дальнейших экспериментах использовался чистый песок.

Таблица 1

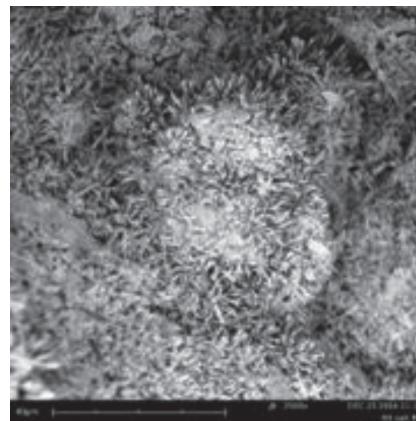
Влияние загрязняющих примесей в заполнителе на прочность мелкозернистого бетона

Состав мелкозернистого бетона ПЦ: песок в пропорции	Прочность мелкозернистого бетона, МПа, в зависимости от количества загрязняющих примесей в песке, %			
	8,0		0,3	
	R _{изг}	R _{сж}	R _{изг}	R _{сж}
1:3	7,4	29,5	7,9	33,0

Примечание. * Коэффициент вариации при определении прочности составлял не более 2,5%.



а)

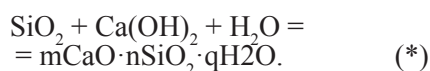


б)

Рис. 1. Микроструктура образцов при увеличении 2500: а – контрольный образец; б – образец с добавлением микрокремнезема МК-85

Модифицирование микрокремнеземом

Добавка – микрокремнезем – являясь отходом производства, имеет высокую удельную поверхность (2180 м²/кг, при сравнении – данный цемент имеет удельную поверхность 354 м²/кг). Положительное действие микрокремнезема в цементных композициях объясняется реакцией пуццоланизации (схема *) [3].



Иллюстрации структуры образцов выполнены с помощью растрового сканирующего электронного микроскопа Phenom G2 Pure. Анализ снимков показал высокую пористость немодифицированного бетона (рис. 1, а). Добавление микрокремнезема существенно изменяет микроструктуру материала, в которой формируются гидросиликаты кальция игольчатой структуры (рис. 1, б).

Это также подтверждается данными дифференциально-сканирующей калориметрии (рис. 2).

Таблица 2

Влияние массовой доли микрокремнезема на прочностные показатели мелкозернистого бетона

Микрокремнезем, %	Прочностные показатели мелкозернистого бетона, МПа	
	R _{изг}	R _{сж}
0	7,9	33,0
4	8,8	36,8
8	8,9	43,9
12	9,0	51,0
14	8,9	44,2

Примечание. * Коэффициент вариации при определении прочности составлял не более 2,5%.

Добавление микрокремнезема способствует образованию гидросиликатов кальция меньшей основности. Это характеризуется экзотермическим эффектом, проявляемым на линии ДСК при температуре 930 °С, соответствующим кристаллизации безводного силиката кальция. На линии TGA у образцов,

модифицированных микрокремнеземом, отмечается меньшее количество несвязанной воды, которая вследствие ступенчатой дегидратации удаляется как при низких, так и при высоких температурах. Эндотермические эффекты на границах температур 700–850 °С подтверждают образование гидросиликатов кальция разной основности. При этом удаление кристаллогидратной воды в контрольном образце происходит при температуре 825 °С, а в образце с микрокремнеземом происходит при температуре 788 °С.

Кристаллы гидроксида кальция обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция [4–6], что предопределяет более низкие механические показатели контрольных образцов, изготовленных без микрокремнезема (табл. 2).

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что зависимость прочностных свойств бетона от массовой доли микрокремнезема не монотонная. Максимальные значения прочности достигаются при массовой доле равной 12 %, прочность на сжатие при этом повышается почти на 55 %, а на изгиб – почти на 14 %.

Модифицирование диопсидом

При введении диопсида, в качестве добавки, происходит перераспределение напряжений при приложении внешней нагрузки. Твердость диопсида по шкале Мооса равна 7, а это значит, что модуль упругости материала добавки больше, чем у цементного камня, и концентрация напряжений будет происходить на частицах добавки, что приведет к увеличению механической прочности образцов.

Диопсид был измельчен в разных мельницах до различной дисперсности. Были получены 3 размера – 52,5 мкм, 10,4 и 8,9 мкм. Массовая доля диопсида варьировалась от нуля до девяти процентов от массы цемента. Полученные прочностные характеристики приведены в табл. 3.

Проведенные эксперименты показывают, что введение диопсида во всех случаях повышает прочностные свойства. Характер влияния массовой доли при этом не универсален и определяется средним размером модифицирующих частиц. С уменьшением дисперсности значения массовой доли добавки, при которой достигается максимальная прочность, также снижается. Оптимальное значение содержания добавки с наименьшими частицами составляет 3 %, а с наибольшими – 7 %. При этом достигаемые значения прочности по сжатию оказываются весьма близки и изменяются от 46,3 до 48,4 МПа. В свою очередь, прочность на изгиб изменяется от 8,2 до 8,6 МПа.

Проведенные эксперименты показывают, что введение диопсида во всех случаях повышает прочностные свойства. Характер влияния массовой доли при этом не универсален и определяется средним размером модифицирующих частиц. С уменьшением дисперсности значения массовой доли добавки, при которой достигается максимальная прочность, также снижается. Оптимальное значение содержания добавки с наименьшими частицами составляет 3 %, а с наибольшими – 7 %. При этом достигаемые значения прочности по сжатию оказываются весьма близки и изменяются от 46,3 до 48,4 МПа. В свою очередь, прочность на изгиб изменяется от 8,2 до 8,6 МПа.

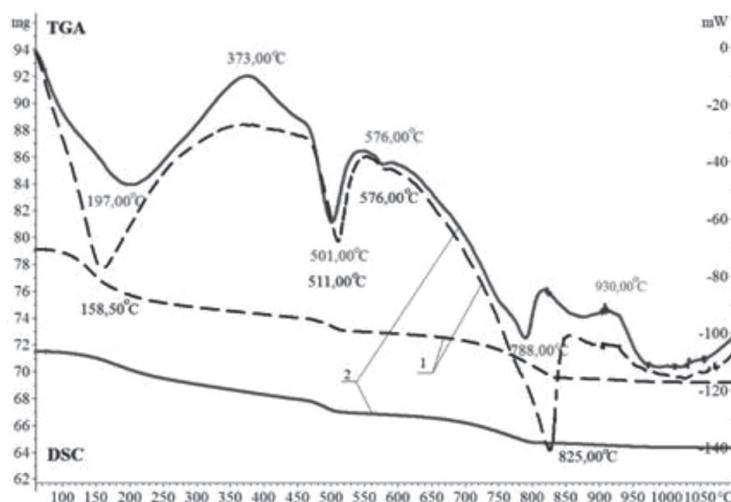


Рис. 2. Дифференциально-сканирующая калориметрия образцов после высолообразования:
1 – контрольный образец; 2 – образец с микрокремнеземом МК-85 в сочетании с пластификатором

Таблица 3

Влияние количества и дисперсности диопсида на прочность при сжатии мелкозернистого бетона

Количество диопсида, %	Прочностные показатели бетона, МПа					
	Дисперсность добавок, мкм					
	8,9		10,4		52,5	
	R _{изг}	R _{сж}	R _{изг}	R _{сж}	R _{изг}	R _{сж}
0	7,9	33,0	7,9	33,0	7,9	33,0
1	7,9	38,3	7,9	37,4	8,0	36,8
3	8,2	48,1	8	43,6	8,4	41,9
5	8,0	43,9	8,4	46,3	8,6	45,2
7	7,9	41,0	8,2	42,7	8,6	48,4
9	7,9	38,5	7,9	39,2	8,3	42,2

Примечание. * Коэффициент вариации при определении прочности составлял не более 2,5%.

Таблица 4

Влияние совместной добавки микрокремнезема и диопсида на прочность мелкозернистого бетона

Размер зерен диопсида, мкм	Количество добавки, % мас.		Прочностные показатели, МПа, мелкозернистого бетона	
	диопсида	микрокремнезема	R _{изг}	R _{сж}
0	0	0	7,9	33,0
8,9	5	0	8,1	48,1
8,9	5	4	8,9	53,4
8,9	5	8	8,1	55,1
8,9	5	12	7,9	75,8
8,9	5	14	7,7	69,1
52,5	7	0	8,6	48,4
52,5	7	4	8,5	59,9
52,5	7	8	8,3	63,7
52,5	7	12	8,3	82,7
52,5	7	14	8,3	77,9

Примечание. * Коэффициент вариации при определении прочности составлял не более 2,5%.

Измельчение на мельнице АГО-9 является экономически нецелесообразным из-за большого расхода энергии и несущественного различия дисперсности, поэтому для дальнейшего эксперимента выбраны порошки диопсида с диаметром частиц 8,9 и 52,5 мкм, концентрация 3% и 7% соответственно, имеющие наиболее высокое влияние на упрочнение образцов. Результаты испытаний на изгиб и сжатие представлены в табл. 4.

Как видно из таблицы, использование для приготовления мелкозернистого бетона модифицирующих добавок, включающих одновременно микрокремнезем и диопсид, приводит к заметному эффекту. Прочность на сжатие при совместном использовании добавок оказывается выше, чем при отдельном использовании каждой

из них. Максимальное упрочнение бетона достигается при введении комплексной добавки, включающей 7% по массе диопсида с частицами размером 52,5 мкм и 12% микрокремнезема. Прочность на сжатие мелкозернистого бетона при этом увеличивается в 2,5 раза.

Максимальная прочность на изгиб при использовании комплексной добавки фиксируется при 3% диопсида с частицами размером 8,9 мкм и 4% микрокремнезема. При максимальном значении прочности изученных образцов на сжатие их прочность на изгиб меньше максимальной примерно на 7%.

Закключение

Таким образом, использование минеральных добавок [1], как инертных (диоп-

сида), так и активных (микрокремнезема), в качестве модифицирующих добавок позволяет получать мелкозернистый бетон с высокими показателями прочности.

Введение диоксида приводит к существенному повышению прочности образцов, вследствие микроармирования структуры и перераспределения напряжений в случае приложения внешней нагрузки. Из числа рассмотренных составов максимальное увеличение прочности – на 45,7% и 46,7% – достигается при введении 3% диоксида с дисперсностью 8,9 мкм и 7% диоксида с дисперсностью 52,5 мкм соответственно.

С уменьшением дисперсности инертной минеральной добавки уменьшается ее оптимальное количество, обеспечивающее наибольшее упрочнение, что соответствует теории плотнейшей упаковки частиц [2].

Добавление в состав мелкозернистого бетона 12% микрокремнезема позволяет увеличить прочность на сжатие до 55%, так как микрокремнезем связывает свободный гидроксид кальция в низкоосновные гидросиликаты кальция, имеющие большую прочность.

В случае с микрокремнеземом правило Полинга не может быть применено, так как в нем не учитывается химизм добавки. Оптимальная концентрация достигается в случае, когда микрокремнезема достаточно для участия в химической реакции.

Наибольшую эффективность оказывает комплексное введение 12% микрокремнезема и 7% диоксида с дисперсностью 52,5 мкм. Мелкозернистый бетон с таким соотношением добавок имеет прочностные характеристики в 2,5 раза выше по сравнению с контрольным, сочетая в себе оба механизма упрочнения инертной и активной добавок.

Список литературы

1. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников – М.: Стройиздат, 1979. – С. 476.
2. Ильина Л.В. Влияние дисперсности минеральных добавок на прочность цементного камня / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, М.А. Раков, А.В. Мельников // Новые технологии в строительном материаловедении. – 2012. – С. 68–71.
3. Кирсанова А.А. К вопросу о долговечности бетонов с комплексными добавками, включающими метакраин / Кирсанова А.А., Ионов Ю.В., Крамар Л.Я. // Фундаментальные и прикладные науки – основа современной инновационной системы. – 2015. – С. 198–203.
4. Лесовик В.В. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов / В.В. Лесовик, В.В. Потапов, Н.И. Алфимова, А.В. Иванов // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 60–62.
5. Лесовик Р.В. Высокопрочный мелкозернистый бетон на композиционных вяжущих и техногенных песках для монолитного строительства / Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, Д.М. Сопин, М.С. Агеева – Белгород: БГТУ, 2013. – С. 106.
6. Стефаниду М. Влияние нано-SiO₂ на цементные растворы / М. Стефаниду, И. Папаянни // Композиты. – 2012. – № 6. – С. 2706–2710.