

УДК 691.32

Федосов С.В. – доктор технических наук, профессор, академик РААСН, ректор

E-mail: rektor@igasa.ru

Акулова М.В. – доктор технических наук, профессор, советник РААСН

E-mail: dekan-sf@igasru.ru

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет

Краснов А.М. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: ksmts@marstu.net

Кононова О.В. – кандидат технических наук, доцент

Черепов В.Д. – аспирант, ассистент

Марийский государственный технический университет

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Разработана технология изготовления высокопрочного мелкозернистого бетона при расходе бездобавочного портландцемента не более 310 кг на 1 м³ бетона, обеспечивающая прочность при сжатии в пределах 85...94 МПа и плотность 2330 кг/м³ в воздушно-сухих условиях.

Технология основана на применении разночастотного виброуплотнения и предполагает использование наполненного цемента совместного домола с удельной поверхностью 500 м²/кг. Вяжущее содержит тонкодисперсный кварцевый наполнитель при соотношении портландцемента к наполнителю Ц:МН = 1:0,8...0,9. Изучены физико-механические и физико-технические свойства исследуемого бетона, а также его долговечность в условиях влажного и температурного воздействия.

Установлено, что полученные физико-технические характеристики высоконаполненного мелкозернистого бетона – результат взаимодействия тонкодисперсных частиц кварцевых зерен наполнителя с цементной пленкой матричного вяжущего в формирующейся структуре мелкозернистого бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: удельная поверхность, дисперсность, разночастотное виброуплотнение, формирование структуры, ювенильная поверхность, активная группа SiOH.

Fedosov S.V. – doctor of technical sciences, professor, member of RAACS, rector

Akulova M.V. – doctor of technical sciences, professor, adviser of RAACS

Ivanov State Architectural and Construction University

Krasnov A.M. – candidate of technical sciences, associate professor

Kononova O.V. – candidate of technical sciences, associate professor

Cherepov V.D. – post-graduate student, assistant

Mary State Technical University

SAND CONCRETE OF HIGH STRENGTH

ABSTRACT

A fine-grain high-impact concrete technology is developed which uses the no-addition portland cement not more than 310 kg per 1 concrete cubic metre providing the 85...94 MPa compression resistance and the 2326 kg per cubic metre solidity in air-dry conditions.

The technology is based on application of the vibratory compaction and intends the usage of filled joint re-milling cement having a specific surface area of 500 square metre per kilo. The matrix material contains a finely dispersed quartz filler by the portland cement-to-filler ratio 1: 0.8...0.9. Physical and mechanical, physicochemical characteristics, water curing and effect of temperature are examined.

It is found out that the obtained quality characteristics of highly filled high-impact fine grain concrete are the result of mutual interaction between disperse particles of quartz filler and cement skin of matrix material in forming structure of fine grain concrete.

KEYWORDS: specific surface area, dispersivity, vibratory compaction, structure formation, juvenile surface, SiOH⁻ active group.

Большая часть территории Российской Федерации находится в суровых климатических условиях. В течение продолжительного периода времени (зима, осень, весна) строительные конструкции испытывают воздействие многократно повторяющихся циклов замораживания и оттаивания. Резкие циклические перепады температур особенно опасны для конструкций, подверженных водонасыщению при эксплуатации, в частности для строительных конструкций автомобильных дорог. Напряжения, возникающие в порах при замерзании воды, определяют развитие процессов трещинообразования в бетонных дорожных конструкциях.

Компоненты бетона обладают различными коэффициентами температурного расширения. Это приводит не только к возникновению поверхностных, но и к развитию внутренних трещин. Динамические нагрузки от воздействия колес многотоннажных автопоездов усиливают процесс трещинообразования. Снижение стоимости и повышение долговечности бетонных дорожных покрытий – важная народно-хозяйственная задача.

Снижение стоимости дорожных строительных бетонных изделий, особенно в регионах, в которых отмечается дефицит крупного заполнителя, может решаться за счет развития производства высокопрочных долговечных бетонов на основе местных природных кварцевых песков [1]. Большинство регионов России располагают большими запасами природных кварцевых песков, на основе которых освоено изготовление мелкоштучных дорожных изделий. Мелкозернистые бетоны могут заменить обычные тяжелые цементные бетоны при условии, если они не уступают им по ряду физико-технических характеристик: морозостойкости, прочности при изгибе и при растяжении. Одним из препятствий на пути использования мелкозернистых бетонов в крупногабаритных дорожных изделиях являются их повышенная усадка и ползучесть. Снижение показателей усадки и ползучести мелкозернистых бетонов может быть достигнуто повышением концентрации твердой фазы при оптимальном наполнении межзерновых пустот бетона высокодисперсными минеральными частицами природного, искусственного и в том числе техногенного происхождения. Положительное влияние наполнителей на структуру и свойства цементных систем наиболее детально описано в трудах П.П. Будникова, А.В. Волженского и Л.Н. Попова, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.И. Соломатова, Б.В. Гусева, А.Г. Ольгинского, А.А. Редкозубова, М.Р. Стаса, И.М. Красного, Ю.М. Баженова, П.Г. Комохова, Н.В. Свиридова, С.С. Каприелова.

Известно, что повышение концентрации твердой фазы в бетонной смеси сопровождается ростом ее вязкости в связи с сокращением толщины диффузного слоя сольватных оболочек вокруг твердых частиц системы. Необходимо обеспечить повышение удобоукладываемости цементно-песчаной смеси при низких водоцементных отношениях ($V/C = 0,25 \dots 0,27$) регулированием части свободной (диффузной) воды до образования жестко-пластичного состояния и увеличением объема химически активной коагуляционной среды при использовании наполненного вяжущего совместного помола, применение которого способствует возникновению прочных связей за счет активации процессов гидратации клинкерных минералов [2].

Разработка технологии мелкозернистого цементного бетона на кварцевых песках проводилась исходя из положения оптимизации условий для активации кварцнаполненного вяжущего совместного помола на границе раздела фаз.

Известно, что энергетический потенциал поверхности зёрен кварцевого наполнителя зависит от атомно-молекулярных особенностей структуры кремнезёма. Появление на поверхности зерен кварца при помоле активных групп $SiOH$ в присутствии ионов щелочных и щелочноземельных металлов способствует интенсификации физико-химического и химического взаимодействия на границе раздела фаз.

В формировании структурной плотности и прочности мелкозернистого цементного бетона рассматриваются два технологических этапа. К первому относят самопроизвольное объединение дисперсной системы в структурные блоки за счёт избыточной энергии системы: цементное зерно – наполнитель – вода. Ко второму – внешнее механическое воздействие на систему, направленное на создание плотной структуры дисперсной системы, за счёт изменения расстояния между ее структурными элементами. Механическое воздействие на систему приводит к разрушению ее первоначальной структуры, к сближению структурных элементов различного размера и к доведению их до минимальных значений.

Для уплотнения структуры мелкозернистого бетона была применена разночастотная вибрационная установка, в которой для перемещения более крупных кварцевых частиц диаметром $0,4 \dots 1,5$ мм использована вибрация с частотой $f = 50$ Гц [3], а для перемещения более мелких частиц

твёрдой фазы кварцнаполненного цементного вяжущего – вибрационное воздействие с частотой $f = 167$ Гц. При совместной работе двух вибровозбудителей установки [4] создавался совмещенный режим виброколебаний бетонной смеси.

Удельное давление пригрузочного устройства при формировании бетонной смеси было определено математическим расчётом по разработанной методике [5] и составляло $P_{уд} = 0,0131$ МПа.

Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона в зависимости от режима виброуплотнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики мелкозернистого песчаного бетона в зависимости от режима виброформования при удельном давлении 0,0131 МПа

Режим виброуплотнения	Время виброуплотнения, с	Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона								
		В/В	В/Ц	Средняя плотность, кг/м ³ при наполнении Ц:МН			Прочность бетона, МПа		Водопоглощение, %	Прирост прочности, %
				1:0	1:08	1:3	R _b	R _{bt}		
A=1,25мм, f=50Гц	180	0,303	$\frac{0,546}{0,0750^*}$	2135	2270	1920	70	7,3	7,0	0,0
A=0,70мм, f=167Гц	150	0,307	$\frac{0,552}{0,0755^*}$	2175	2302	1970	83	9,5	3,5	18,6
A=1,45мм, f=50Гц A=0,20мм, f=167Гц	120	0,310	$\frac{0,559}{0,0757^*}$	2230	2326	2100	94	11,0	2,8	34,3

Примечание: * В знаменателе – водотвердое отношение.

При двухчастотном режиме вибрационного воздействия была получена максимальная прочность мелкозернистого бетона при сжатии – 94 МПа и средняя плотность в сухом состоянии – 2326 кг/м³.

Прочность мелкозернистого бетона на основе различных по составу наполнителей (из карбоната кальция, керамзитовой пыли) определяется образованием в контактной зоне кристаллогидратов, по форме и свойствам отличающихся от обычного цементного камня (ЦК).

На керамзитовых частичках пористого наполнителя, активных по отношению к клинкерным минералам, низкоосновные гидросиликаты кальция типа CSH(I) образуются в меньшем объеме, чем на поверхности кварцевых зерен. На поверхности карбонатных наполнителей происходит ориентированный рост кристаллов карбонатов – CaCO₃, CaCO₃·6H₂O, неустойчивых кристаллов Ca(OH)₂, гидрогранатов – C₃AS_xH_{6-2x}, гидросиликатов кальция, преимущественно типа CSH(I), и гидрокарбоалюминатов кальция, считающихся наиболее устойчивыми [6].

Важнейшим структурным элементом кристаллогидратных пакетов наполненного цементного камня считается межплоскостная кристаллизационная вода. Ее потеря приводит к падению прочности бетона. Следовательно, для образования плотной структуры ЦК в объеме цементной пленки необходим оптимальный объем жидкой фазы в период первых часов твердения [2].

В технологии высоконаполненного мелкозернистого бетона (ВМБ) была получена оптимальная величина В/Ц=0,55-0,56, а оптимальное количество наполнителя с удельной поверхности 245...270 кг/м³ составило 0,8-0,9 от массы вяжущего с удельной поверхностью S_{уд}=450...500 м²/кг. Оптимальная удельная поверхность компонентов вяжущего сыграла значительную роль в достижении прочностных свойств мелкозернистого бетона и его средней плотности. На рис. 1 представлены прочностные свойства ВМБ в зависимости от соотношения по массе цемента и кварцевого микронаполнителя в рецептуре бетона. Эта зависимость выражена характерной для данного способа уплотнения кривой, состоящей из восходящей – упрочняющей и нисходящей – разупрочняющей ветвей с максимумом при оптимальном соотношении цемента и кварцевого микронаполнителя.

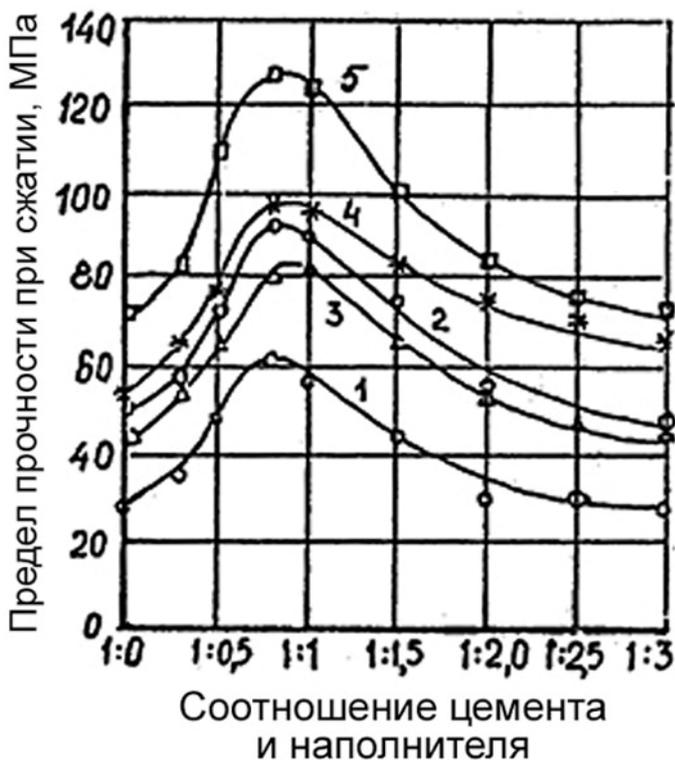


Рис. 1. Влияние условий и времени твердения на прочность наполненного мелкозернистого (песчаного) бетона различного частотного вибрационного уплотнения в зависимости от содержания наполнителя (МН) в цементе:
 1, 2 – прочность влажного и сухого бетона после ТВО и 28 суток выдержки в нормальных условиях;
 3 – прочность суточного бетона после ТВО; 4 – то же, после 240 суток выдержки в воздушно-сухих условиях ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W = 50-60\%$); 5 – то же, в нормальных условиях ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 95-99\%$)

Следует также отметить, что оптимальная прочность наполненного цементного камня на частично прогидратированных зернах наполненного вяжущего при его предварительной выдержке во влажной среде ($W = 95...99\%$, $T = 18-22\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение длительного срока до $t = 1080$ суток находится в зависимости от содержания наполнителя и периода выдержки. Общая, межзерновая и открытая пористости бетона повышаются с увеличением периода предварительной выдержки наполненного цемента во влажной среде.

На рис. 2 представлена микроструктура ВМБ с равномерно расположенными зёрнами кварцевого заполнителя, между которыми видны плотные структуры микрочастиц кварцевых наполнителей в виде структурных блоков – сеток.

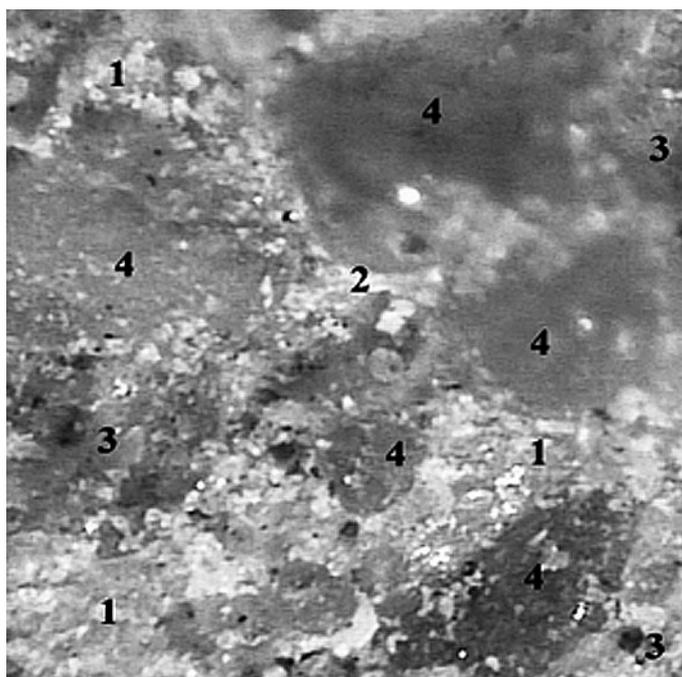


Рис. 2. Микроструктура мелкозернистого бетона (кривая 2, рис. 1) с содержанием кварцевого микронаполнителя (0,9...1,0) Ц, (Ч 500): 1 – зерно микронаполнителя; 2 – пленка цементного камня; 3 – микропоры; 4 – жесткий каркас из песчаного кварцевого зерна

Результаты экспериментов по определению оптимального состава ВМБ были подтверждены исследованиями наполненного цементного камня и мелкозернистого бетона при использовании в качестве модели полинома второго порядка и реализации композиционного плана на кубе типа В₃.

Определены физико-механические, деформативные свойства и долговечность высокопрочного мелкозернистого бетона в зависимости от внешних эксплуатационных факторов – воздействий воды, температуры.

Исследования истираемости мелкозернистого бетона, приготовленного по описанной технологии, показали, что потеря массы (г/см²) при испытании на лабораторном круге истирания в 2...4 раза меньше, чем у обычных мелкозернистых бетонов.

Водопроницаемость мелкозернистого бетона была определена по коэффициенту водопроницаемости:

$$K = (b \cdot V) / (S \cdot t \cdot \Delta p), \quad (1)$$

где V – объем жидкости, протекающей через тело; b – толщина материала; S – площадь фильтрации; t – время фильтрации; Δp – перепад давления. Водопроницаемость мелкозернистого бетона оказалась на порядок ниже, чем у обычного мелкозернистого бетона.

К разрушающим факторам следует отнести систематическое переменное водонасыщение и высушивание.

Исследовано изменение прочности ВМБ после каждых 30 циклов насыщения и высушивания по режиму: 4 часа водопоглощения и 4 часа высушивания при 100 °С. Исследованиями установлено приращение прочности при сжатии бетона за счет гидратации вяжущего на 150 цикле. Прочность бетона составила $R_b=115$ МПа при среднем начальном значении $R_b=94$ МПа.

Морозостойкость ВМБ, определенная по I базовому методу ГОСТ 10060-95, составила F700, по II методу – F300.

Модуль упругости бетона E_0 составил $(30...34) \cdot 10^3$ МПа.

Усадка ВМБ при нормальных климатических условиях составила $\epsilon_y=0,120$ мм/м. Малая величина ϵ_y , в сравнении с другими строительными материалами, соответствует плотной структуре композита.

Деформации вследствие ползучести цементного бетона обуславливают долговечность бетонных конструкций. На характер роста деформаций во времени под действием статической нагрузки влияют следующие факторы: уровень начальных напряжений $\sigma/R_{пр}$; параметры окружающей среды, определяющие скорость массообмена влажного бетона; напряжения, возникающие вследствие усадки.

ВМБ в возрасте 28 суток выдержки в нормальных условиях после тепловлажностной обработки, нагруженный усилием статической нагрузки с напряжением 0,2; 0,4; 0,5 $R_{пр}$, показал величину деформаций при сроке наблюдения 240 суток соответственно: $E_{полз}^{240} = 0,134; 0,225; 0,370$ мм/м. В возрасте 660 суток ВМБ второй серии (0,4 $R_{пр}$) показал деформацию вследствие ползучести 0,310 мм/м.

Таблица 2

Деформации мелкозернистых бетонов вследствие ползучести

Состав бетона, кг/м ³				Срок набл. t, сут.	$R_{пр.}$, МПа	$\sigma / R_{пр}$	Мера ползучести, см ² /кг	$\epsilon_{полз.}$, мм/м	Авторские источники
Ц	МН	В	В/Ц						
306	288	170	0,555	240	45	0,2	1,49	0,1340	Авторы статьи
260	90	190	0,73	240	19,4	0,25	14,70	0,713	[7]
435	145	327	0,75	240	30,7	0,25	15,0	11,513	[7]
414	-	180	0,40	240	43,8	0,20	8,48	-	[8]
487	255*	168	0,35	-	56,0	0,30	20,6	-	[9]

Примечание: Применен* модификатор МБ-50С (кремнезем + зола уноса + суперпластификатор в соотношении 43:43:14).

Температуростойкость ВМБ зависит от исходной влажности микро- и макроструктур материала и определяется потенциальной энергией связи между кристаллическим скелетом бетона и заполняющей его водой. При испарении влаги давление пара в капиллярах ($r = 10^{-11}$ м) может достигать 20 МПа и более, а растягивающие напряжения повышаются до 16,2 МПа [10]. Цементный бетон имеет критическую сорбционную влажность W_c , выше которой при градиенте температур $\Delta t > 100$ °С может произойти разрушение с отколом кусков бетона в виде линз [10].

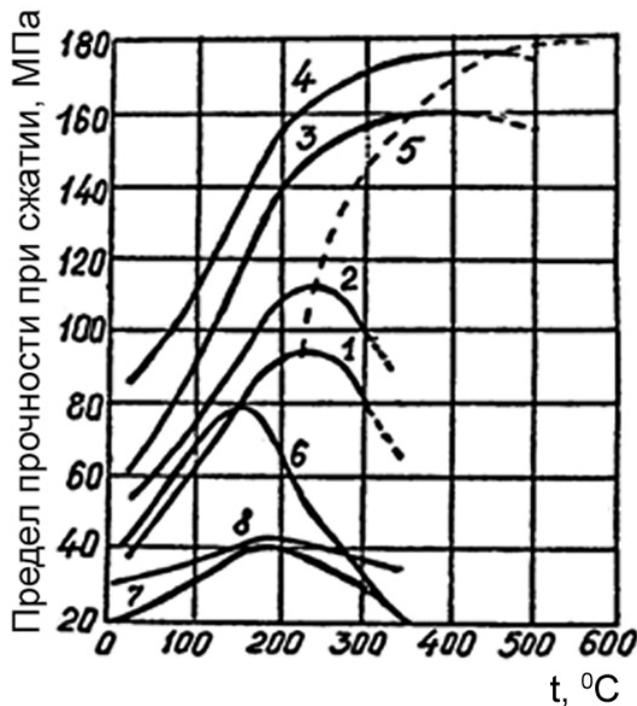


Рис. 3. Температуростойкость высоконаполненного мелкозернистого бетона при первом нагреве: 1 – после ТВО суточной выдержки при $t = 20^\circ\text{C}$, $W_B = 65\%$, В25; 2 – то же, В40; 3 – то же, 28-суточной выдержки, В45; 4 – то же, 120-суточной выдержки, В60; 5 – кривая экстремальных величин прочности; 6 – цементно-песчаный раствор состава 1:3 28 суточной выдержки (А.В. Волженский и Л.Н. Попов); 7 – то же, на песчаном диоритовом заполнителе [10]; 8 – тяжелый бетон на диоритовом крупном заполнителе [10]

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что высоконаполненный мелкозернистый бетон, изготовленный по предложенной технологии, по своим качественным характеристикам может быть использован для изготовления крупноразмерных изделий во многих регионах России при строительстве инженерных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинина Л.А., Батраков В.Г. Бетонведение: настоящее и будущее // Бетон и железобетон, 2003, № 1. – С. 6-8.
2. Холодный А.Г., Мчедлов-Петросян О.П. Влияние водоцементного отношения на кинетику структурообразования при твердении портландцемента // Управляемое структурообразование в производстве строительных материалов. – Киев: Будивельник, 1968. – С. 10-14.
3. А.с. 1310362 СССР. МКИ¹ С 04 В 28/00. Бетонная смесь / А.М. Краснов, В.Г. Журавлев, С.В. Аганина, Е.П. Новожилова. (СССР). – № 3707224/29-33; заявл. 30.10.84; опубл. 15.05.87, Бюл. № 18. – 3 с.
4. Пат. 2214910 Российская Федерация, МКИ⁷ В 28 В1/08. Способ формования строительных изделий из бетонной смеси / А. М. Краснов (Россия). – № 200210628/03; заявл. 04.02.02; опубл. 27.10.03, Бюл. № 30. – 5 с.
5. Кутько Б.П. Исследование работы пригрузов при формировании бетонных смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Кишинев, 1981. – 24 с.
6. Ларионова З.М., Никитина Л.В., Гарашин В.Р. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 262 с.
7. Львович К.И., Яструбинецкий В.А. Деформации песчаных бетонов под нагрузкой // Бетон и железобетон, 1980, № 2. – С. 18-19.
8. Улицкий И.И. Определение величин деформации ползучести и усадки бетонов. – Киев, 1963. – 348 с.
9. Каприелов С.С., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кузнецов Е.Н. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона // Бетон и железобетон, 2003, № 3. – С. 2-7.
10. Жуков В.В. Основы стойкости бетона при действии повышенных и высоких температур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. – М., 1981. – 43 с.