

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Строительный факультет

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА И
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы 73-й студенческой
научно-технической конференции

12-18 мая 2017 г.

Минск
БНТУ
2017

УДК 691.32

ББК 38.3

А 43

Редакционная коллегия:

Э. И. Батяновский – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы»;

М. Г. Бортницкая – старший преподаватель кафедры «Технология бетона и строительные материалы»

Рецензенты:

В. В. Бабицкий – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология бетона и строительные материалы»;

Г. Т. Широкий – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология бетона и строительные материалы»;

П. И. Юхневский – д-р техн. наук, доцент кафедры «Технология бетона и строительные материалы»

Сборник содержит материалы 73-й студенческой научно-технической конференции «Актуальные проблемы технологии бетона и строительных материалов». В издании освещены материалы пленарного заседания, исследующего проблемы технологии производства и особенности эксплуатации бетона и других строительных материалов.

Издание предназначено для научно-педагогических работников, студентов, магистрантов и аспирантов.

СОДЕРЖАНИЕ

Мищенко Е. С., Яцкевич А. В. Исследование жаростойкости и термостойкости бетона на пористых заполнителях и заполнителях из плотных горных пород 4

Вышедко М. В., Захарчук И. С. Повышение физико-механических свойств бетона путем нормализации гранулометрии заполнителей 12

Змушко Д. В., Кохнович Е. С., Скариня О. Н., Мажанова А. И. Строительная 3D-печать: оборудование, способы формования, сферы применения, особенности бетонокомпозитов 21

Ковальчук К. А. Оптимизация минералогического и вещественного состава портландцемента для повышения его сульфатостойкости 30

**Исследование жаростойкости и термостойкости бетона
на пористых заполнителях и заполнителях из плотных горных
пород**

Мищенко Е. С., Яцкевич А. В.

Научный руководитель – Бондарович А.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сопротивление бетона кратковременному воздействию огня в случае пожара называют его огнестойкостью. Жаростойкость же бетона представляет собой стойкость бетонов при постоянном и длительном воздействии высокой температуры при эксплуатации различных тепловых агрегатов (бетон жароупорный).

Из-за относительно низкой теплопроводности бетона непродолжительное действие высоких температур не вызывает достаточного нагревания бетона, а также арматуры, которая находится под защитным слоем. Гораздо опаснее является поливание холодной водой сильно разогретого бетона (к примеру, при тушении пожара). При этом холодная вода вызывает образование трещин, нарушение защитного слоя, а также обнажение арматуры при не прекращающемся воздействии высоких температур.

В зависимости от степени огнеупорности различают жаростойкие бетоны: высокоогнеупорные — с огнеупорностью выше 1770°С, огнеупорные — от 1580 до 1770°С, жароупорные — 1580°С.

Дополнительные требования к заполнителям для жаростойких бетонов состоят в следующем. Заполнители не должны разрушаться или размягчаться при длительном воздействии высоких температур, а также не должны вызывать появление больших внутренних напряжений в бетоне при нагревании.

При температуре эксплуатации до 600...800°С в качестве заполнителей могут применяться бескварцевые горные породы (диорит, андезит, базальт, диабаз), доменные шлаки, кирпичный бой, природные пористые заполнители вулканического происхождения, искусственные пористые заполнители (аглопорит, керамзит, вспученные перлит и вермикулит, шлаковая пемза и т. п.).

Для эксплуатации при температуре до 1200...1700°С жаростойкие бетоны готовят с использованием в качестве заполнителей дробленого боя огнеупорных материалов (шамотный кирпич, обожженный каолин, магнезит, хромит, корунд и др.).

Материалы для бетона

Вязущее – шлакопортландцемент, с содержанием доменного гранулированного металлургического шлака не более 40% по массе.

Рекомендуется ШПЦ М500 (ГОСТ 10178) либо СЕМ III А 42,5N (СТБ EN 197-1).

Допускается (с сохранением жаростойкости, но с допускаемым снижением прочности): ШПЦ М400 (ГОСТ 10178) либо СЕМ III А 32,5N (СТБ EN 197-1).

Заполнители для тяжелого бетона – щебень и дробленый песок из базальта. Базальтовый щебень – фр. 5...10 мм (ГОСТ 8267); фр. 6...12 мм (СТБ EN 12620). Базальтовый песок – фр. до 5 мм (ГОСТ 8736); фр. до 6 мм (СТБ EN 12620), модулем крупности ($M_k \geq 2,0$).

Заполнители для «облегченного» бетона. Керамзитовый песок по ГОСТ 25137 (производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль») средней насыпной плотностью: $\rho_{п.к.}^0 \sim 600\text{--}650 \text{ кг/м}^3$, фракция 0/4 мм. Щебень гранитный (РУПП «Гранит», г. Микашевичи) фракции: 5...10 мм (ГОСТ 8267); 6...12 мм (СТБ EN 12620).

Вода для затворения бетона (ГОСТ 23732; СТБ ГОСТ Р 51593; СТБ 1114).

Химические добавки. Пластификаторы I-ой группы (СТБ 1112). Рекомендуется: «Реламикс ПК» (ТУ ВУ 190679156.002-2013); допускается: «Стахемент 2000М» (ТУ ВУ 800013176.004-2011); «Sika Visco Crete 3180» ТУ 2493-009-13613997-2011.

Ускоритель твердения – сульфат натрия кристаллизационный (Na_2SO_4 ; ГОСТ 6318; безводный).

Микрокремнезем (минеральная добавка для повышения жаростойкости, плотности, прочности). Рекомендуется: МК – 85 (ТУ 5743-048-02495332-96); допускается: МКУ – 85 (уплотненный).

Фибра металлическая ФСВ-А-0.60/30 (ОАО «БМЗ»).

Аглопоритовый щебень по ГОСТ 25137, средней насыпной плотностью: $\rho_{п.к.}^0 \sim 800\text{--}850 \text{ кг/м}^3$, фракция 5/10 мм.

Составы бетона жаростойкостью класса не ниже «ИЗ» (температура применения ~ 300°С).

Состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях.

Класс бетона не ниже С 35/45 по прочности на сжатие (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК \geq 21 см, марка П5).

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.1.

Таблица 1. Состав тяжелого бетона на базальтовых заполнителях

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
- шлакопортландцемент М500 (М400)	450 (500)
- базальтовый щебень (фр. 5...10 или 6...12)	1000
- базальтовый песок (крупностью до 5 или 6 мм)	1000 (950)
- микрокремнезем	13,5 (15)
- вода (из расчета $(В/Ц)_6 \leq 0,3$)	139 (154)
- пластификатор (по сухому веществу от массы цемента от 0,3% до 1%, в зависимости от обеспечиваемой подвижности бетонной смеси)	1,4...4,6
- ускоритель твердения (1% от МЦ)	4,5 (5,0)
Средняя плотность: ~ 2600 кг/м ³ и более, учитывая более высокую плотность базальтовой породы, в сравнении с гранитоидной.	

Примечание 1. При дозировке пластификатора в виде жидкости (традиционно 30% концентрации), ее расход составляет: например, 1,4:0,3 ~ 4,7 кг, с содержанием воды: 4,7 – 1,4 ~ 3,3 литра, которые следует вычесть из воды затворения: 139 – 3,3 ~ 136 кг (л).

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Состав «облегченного» бетона на гранитном (допускается) либо базальтовом (рекомендуется) щебне и керамзитовом песке.

Класс бетона не ниже С 28/35 (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК = 15...20 см (марка ПЗ-П4)).

При большой осадке конуса может проявиться расслоение бетона, и его укладка требует обязательного соблюдения равномерной подачи-распределения при высоте слоя не более 300...400 мм.

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.2.

Таблица 2. Состав «облегченного» бетона

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
шлакопортландцемент М500 (М400)	450 (500)
гранитный (базальтовый) щебень	1000
песок керамзитовый ($\rho_0 \sim 600 \dots 650 \text{ кг/м}^3$)	340
микрокремнезем	13,5 (15)
вода (из расчета «истинного» водоцементного отношения бетона: $(В/Ц)_и \sim 0,3$)	270
пластификатор ($D \sim 0,7\%$ от МЦ р-ра 30% концентрации для подвижности: ОК $\sim 15\text{см}$)	3,15
ускоритель твердения (1% от МЦ, при необходимости)	4,5 (5,0)
Средняя плотность: $\sim 2100 \text{ кг/м}^3$	

Примечание 1. Истинное водоцементное отношение определяется без учета количества воды, поглощенной (и удерживаемой в начальный период) керамзитовым (пористым) заполнителем.

Расход воды на замес «номинальный» т.к. зависит от фактических свойств пористого заполнителя. Требуемую осадку конуса следует обеспечивать не за счет увеличения расхода воды, а увеличивая расход пластификатора.

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Состав легкого аглопоритобетона на аглопоритовом щебне и керамзитовом песке.

Класс бетона не ниже С 25/30 (СТБ 1544) при твердении в нормально-влажностных условиях (осадка конуса бетонной смеси: ОК $\geq 21 \text{ см}$ (марка П5)).

Расход материалов на 1 м³ бетона представлен в табл.3.

Таблица 3. Состав легкого аглопоритобетона

Компоненты бетонной смеси	Расход, кг
шлакопортландцемент М500 (М400)	450 кг; (500 кг);
аглопоритовый щебень (фр. до 10 мм)	450 кг;
песок керамзитовый	310 кг;
микрокремнезем	3,5 (15) кг;
вода ((В/Ц) _{ист} ~ 0,3)	310 кг;
пластификатор (р-р 30%; Д ~1,0% от МЦ)	4,2 кг;
ускоритель твердения (1,5% от МЦ, при необходимости)	6,75 (7,5) кг.
Средняя плотность: ~ 1500÷1600 кг/м ³	

Примечание 1. Расход воды соответствует ранее приведенному.

Примечание 2. Рекомендуется введение фибры металлической в количестве 40 кг на 1 м³ бетона.

Результаты оценки жаростойкости и термостойкости бетона по ГОСТ 20910.

Жаростойкость бетона определяли по состоянию внешнего вида и остаточной прочности после нагрева до ~ 350°C (для класса «И 3» температура не ниже 300°C) образцов (70x70x70 мм), после 7 суток их твердения в нормально-влажностных условиях ($t \sim 20^\circ\text{C}$; $\varphi \geq 90\%$) и предварительной сушки 48 ч при $t = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ и их последующего выдерживания 7 суток над водой. «Остаточная» прочность по ГОСТ 20910 должна быть не ниже 80% от «начальной».

Результаты испытаний без переводного коэффициента приведены в таблице 4.

Термостойкость бетона (до $t = 300^\circ\text{C}$ определяли путем нагрева образцов (в течение 40 мин. при $t \sim 300^\circ\text{C}$) с последующим погружением их в воду ($t \sim 15^\circ\text{C}$) на 5 мин. Затем образцы в течение 10 мин. «обсыхали» и циклы повторяли многократно.

Кроме этого, по той же методике, но не с погружением образцов в воду, а с погружением одной грани имитировали ожидаемые условия эксплуатации бетона.

По ГОСТ 20910 оценивали: внешний вид (наличие и характер трещин) и потери массы образцов (допускается до 20% от начальной). Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 4.Определение жаростойкости бетона

Вариант (вид) бетона	Наличие фибры металлической	Внешний вид (наличие трещин)	Прочность бетона начальная, МПа	Прочность после испытаний (остаточная), МПа	Снижение прочности, %
Тяжелый (базальтовые заполнители)	без	отсутствуют	43,4	40,8	6,4
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	без		37,7	35,8	5,3
	с фиброй		38,5	36,7	4,9
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	без		28,2	27,0	4,4

Вывод: Все запроектированные составы обеспечивают жаростойкость класса «И 3»

Таблица 5. Определение термостойкости бетона (исследования продолжаются)

Вариант (вид) бетона	Наличие фибры мetailлической	Максимально нормированное количество «термоциклов» по ГОСТ 20910	Фактическое количество «термоциклов»	Снижение массы, %	Марка по термостойкости
Тяжелый (базальтовые заполнители)	без	40	30	18,1	T30
Облегченный (щебень гранитный, песок керамзитовый)	без		60	Без снижения (по настоящее время)	Испытания продолжаются
	с фиброй		60		
Легкий аглопоритобетон (щебень аглопоритовый, песок керамзитовый)	без	30			

Особенности технологии приготовления бетона и ведения работ.

Приготовление бетона

Тяжелый бетон, последовательность загрузки компонентов: щебень, песок, микрокремнезем, цемент, вода (50...60 %), химические добавки с водой затворения (50...40 %), фибра.

Облегченный бетон: щебень, микрокремнезем, песок керамзитовый, вода (50...60 %), цемент, химические добавки с водой затворения (50...40 %), фибра.

Легкий аглопоритобетон: щебень, песок керамзитовый, вода (50...60%), микрокремнезем, цемент, химические добавки с водой затворения (50...40%), фибра.

Во всех случаях фибру вводить равномерно через сито из комплекта ситового анализа заполнителей; диаметр отверстий подобрать (10...40 мм).

Подача, укладка, уплотнение бетона

Подача – рекомендуется не более 30 мин. после приготовления. При большом периоде отследить изменение «ОК» и, при необходимости увеличить дозировку пластификатора в пределах (указаны в п.2, состав тяжелого бетона).

Укладка – последовательно, примерно равным слоем в плане, при высоте слоя до 400 мм.

Уплотнение – штыкованием, до оседания бетона; для «ОК» ≤ 15 см. и при наличии возможности – глубинным вибратором с кратковременным (3...5 с.) включением.

Заключение

Все предложенные составы обеспечили жаростойкость класса «И 3», т. е. обеспечивают жаростойкость не менее 300°C.

Учитывая наличие в Беларуси щебня гранитного и песка керамзитового, следует считать основным составом – облегченный бетон на указанных материалах.

Термостойкость тяжелого конструкционного бетона на базальтовых заполнителях, оказалась меньше чем на других испытанных составах, содержащих керамзитовый песок, включая бетон с гранитным щебнем (облегченный состав).

Показатель термостойкости (эксперименты продолжаются) превысил максимально нормируемую марку по ГОСТ 20910 - «Т40».

Повышение физико-механических свойств бетона путем нормализации гранулометрии заполнителей

Вышедко М. В., Захарчук И.С.

Научный руководитель – Федорович П.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Целью данной работы был подбор гранулометрических составов природного песка с целью возможной экономии цемента и повышения физико-механических свойств бетона, путем оптимизации зернового состава для уменьшения пустотности.

Исходным материалом для проведения данной работы стал гранитный отсев предприятия РУПП «Гранит».

Задачи данной работы: изучение свойств гранитного отсева, рационализация зернового состава с целью обеспечения как минимальной пустотности, так и удельной поверхности заполнителя, изучений влияния различных фракций мелкого заполнителя на свойства затвердевшего бетона.

Назначение заполнителей

Заполнители – природные или искусственные материалы, которые в рационально составленной смеси с цементным вяжущим и водой образуют бетон. Стоимость заполнителей достигает 30..50% стоимости бетонных и железобетонных конструкций, а иногда и более. Поэтому изучение, оптимальный выбор, нормализация гранулометрии имеют большое значение.

Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и позволяют сократить расход цемента и других вяжущих, путем оптимизации зернового состава для получения минимальной пустотности, являющихся наиболее дорогой составной частью бетона.

Цементное вяжущее, реагируя с водой, способно схватываться и твердеть, переходя их пластичного тестообразного состояние в твердое.

Цементный камень при твердении претерпевает объемные деформации. Усадка его достигает 2 мм/м. Из-за неравномерности усадочных деформаций возникают внутренние напряжения и тре-

щины. Мелкие трещины могут быть невидны невооруженным глазом, но они резко снижают прочность и долговечность цементного камня. Заполнитель же создает в бетоне жесткий скелет, который воспринимает усадочные напряжения и уменьшает усадку обычного бетона примерно в 10 раз по сравнению с усадкой цементного камня.

Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя увеличивает прочность и модуль упругости бетона (т.е. уменьшает деформации конструкций под нагрузкой), уменьшает ползучесть (т.е. пластические необратимые деформации бетона при длительном действии нагрузки).

Влияние заполнителей на свойства бетонной смеси

Состав бетонной смеси и ее технологические свойства, необходимые для получения необходимой удобоукладываемости смеси, транспортирования, укладки и уплотнения, в значительной мере определяются содержанием и качеством применяемых заполнителей.

При проектировании состава бетонной смеси, как правило, исходят из необходимости получения бетона заданной прочности и консистенции при минимальном расходе цемента.

При подборе составов смеси стремятся получить смесь с минимально возможной пустотностью. Однако смесь с минимальной пустотностью не всегда будет оптимальной в бетоне, так как при выборе правильного соотношения между песком и щебнем необходимо учитывать расходы цемента и воды, т.е. объем цементного теста и их влияние на подвижность.

С уменьшением количества фракций и их размеров в мелком заполнителе неизбежно возрастает объем цементного теста, т.е. растет расход цемента. Эту проблему для строительной отрасли Беларуси может решить прием обогащения природных песков крупными фракциями гранитного отсева.

Результаты экспериментов

Лабораторией НИИЛ БиСМ были проведены работы по изучению свойств гранитного отсева. Были исследованы физико-технические свойства отсева: влажность; плотность; зерновой состав; содержание пылевидных частиц в крупных фракциях отсева (это было необходимо определить для последующего учета при использовании этих фракций в обогащении мелких песков); дроби-

мость. Фактическая величина средней плотности зерен гранитного отсева соответствует $\sim 2708 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 1. Влажность отсева

№ пробы	Масса, г		Влажность		
	до высушивания	после высушивания	потери воды, г	%	средняя, %
1.	2000	1943	57	2,9	3,0
2.	2000	1938	62	3,1	

Таблица 2. Гранулометрический (зерновой) состав отсева

№ пробы	Содержание зерен крупностью (фракции), г (%)							M _к отсева
	<0,14	0,14 ... 0,315	0,315 ... 0,63	0,63 ... 1,25	1,25 ... 2,5	2,5... 5,0	>5	
1	256 (13,0)	336 (17,1)	275 (14,0)	132 (6,7)	327 (16,6)	542 (27,0)	101 (5,1)	2,95
2	210 (10,7)	357 (18,1)	319 (16,2)	125 (6,3)	321 (14,3)	519 (29,0)	117 (5,9)	2,96
Среднее	233 (11,9)	346 (17,6)	297 (15,1)	129 (6,5)	324 (15,4)	530 (28,0)	109 (5,5)	2,96

Анализ данных о зерновом составе отсева показывает, во-первых, повышенное содержание в нем пылевидных фракций менее 0,14 мм, а во-вторых – значительное содержание мелких фракций (< 0,63 мм) в целом. Их количество составляет до 45 % от массы исходного отсева. Также экспериментально было определено, путем отмучивания отсева, что пылевидные фракции (<0,14 мм) содержатся и в более крупных фракциях отсева. В фракции крупнее 0,63 мм пылевидных частиц содержится около 3%. В фракции крупнее 1,25 содержание пылевидных частиц уменьшилось, но не значительно. Они адсорбируются на поверхности более крупных зерен и «сопровождают» их после отсева.

С практических позиций использования крупных фракций отсева можно ориентировочно считать, что они содержат до 3% от массы пылевидных фракций.

Дробимость является косвенной характеристикой прочности исходной горной породы, отражает состояние структуры испытываемой

мого материала. Чем больше в его зернах микротрещин, т.е. дефектов структуры, тем значительнее разрушения и больше количество образующихся измельченных частиц, а значит – ниже качество материала, как заполнителя для конструкционного бетона.

Таблица 3. Дробимость гранитного отсева

Размер меньшей фракции	Масса навески, г	Масса зерен меньше, мм:				Среднее
		0,63	1,25	Отсеянные зерна, г	Показатель дробимости, %	
0,63	700	497	-	203	29,0	29,2
	700	494	-	206	29,4	
1,25	800	-	575	225	28,1	28,0
	800	-	578	222	27,8	

Более крупные фракции характеризуются большей прочностью. Чем мельче фракция отсева, тем в большей степени она «трещиновата» и тем хуже ее собственные физико-механические свойства и значительнее влияние на свойства бетона. Особенно это относится к фракциям менее 0,315 мм, которые кроме массы трещин характеризуются повышенной удельной поверхностью. Все это в совокупности приводит к резкому увеличению водопотребности (при равной подвижности) бетонных смесей, ухудшению их формуемости, повышению расхода цементного теста (цемента) в бетоне равной прочности (в сравнении с бетоном на природном песке стандартного качества).

Исправить ситуацию может предварительное разделение отсева с отделением мелких фракций, которые могут быть использованы при получении портландцемента с минеральной добавкой на их основе.

Принцип подбора требуемого зернового состава песка заключается в определении необходимого содержания недостающих в зерновом составе природного песка крупных фракций, обеспечивающего расчетный модуль крупности и введение их в состав обогащаемого мелкого заполнителя. В данном случае использовались крупные фракции гранитного отсева, начиная с размера 0,63 мм и выше.

Состав бетона для испытаний определен с учетом базового состава бетона по ГОСТ 30459-96, принимаемого для оценки эффективности добавок для бетона [7], и приведен в таблице 4.

Далее приведены результаты испытаний на прочность образцов бетона из равноподвижных бетонных смесей (табл. 5).

Таблица 4. Характеристика состава бетона для испытаний

Номинальный расход материалов, кг/м ³				ρ ₀ бетонной смеси, кг/м ³		ОК, см
цемент	щебень фр. 5-20	Песок	Вода (В/Ц)	расч.	факт.	
350	1150	700	175(0,5)	2375	2365	3-4

Таблица 5. Прочность образцов пропаренного бетона из равноподвижных бетонных смесей

№ п/п	Вид мелкого заполнителя	Прочность образцов бетона, МПа				Прочность бетона,	
		1	2	3	4	МПа	%
Бетон после тепловлажностной обработки (ТВО)							
1.	Природный						
1.1.	Крупный (M _к ~3,2)	32,5	33,3	30,9	32,3	32,2	142
1.2.	Тонкий (M _к = 0,91)	21,4	22,8	23,8	20,4	22,7	100
2.	Обогащенный:						
2.1.	M _к = 2,00	28,5	28,5	33,2	36,0	30,9	136
2.2.	M _к = 2,27	33,1	32,4	30,4	30,9	32,1	141
2.3.	M _к = 2,50	31,4	32,8	39,7	34,7	33,7	148
3.	Природный завода «Спецж/б»	28,1	25,7	26,1	26,6	26,6	100
4.	Обогащенный:						
4.1.	M _к = 2,5	35,0	34,8	35,5	33,7	34,8	131
4.2.	M _к = 3,0	35,3	33,8	35,9	36,4	35,3	133
4.3.	M _к = 3,25	36,9	35,0	35,5	38,0	36,3	136

Бетон проектного возраста (нормально-влажностные условия твердения)							
1.	Природный						
1.1.	Крупный (мытый, $M_k \sim 3,2$)	55,7	53,2	58,8	46,1	56,0	127
1.2.	Тонкий ($M_k = 0,91$)	39,2	46,1	45,6	40,7	44,1	100
2.	Обогащен- ный:						
2.1.	$M_k = 2,00$	41,3	54,6	53,4	51,5	53,2	121
2.2.	$M_k = 2,27$	50,7	55,1	52,3	53,2	53,5	121
2.3.	$M_k = 2,50$	49,9	48,9	55,6	55,8	53,8	122
3.	Природный завода «Спецж/б» (тонкий)	33,9	30,4	43,7	34,9	37,5	100
4.	Обогащен- ный:						
4.1.	$M_k = 2,5$	49,6	39,0	40,4	50,4	46,7	125
4.2.	$M_k = 3,0$	48,5	41,3	42,8	50,4	47,2	126
4.3.	$M_k = 3,25$	51,5	49,4	38,7	45,1	48,7	130

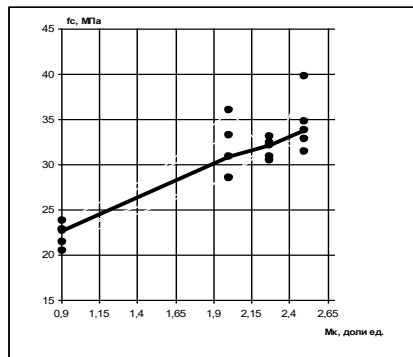
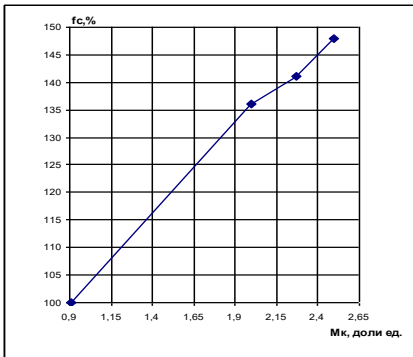


Рис. 1. Тенденция изменений прочности пропаренного бетона в зависимости от модуля крупности песка (исходный $M_k = 0,91$)

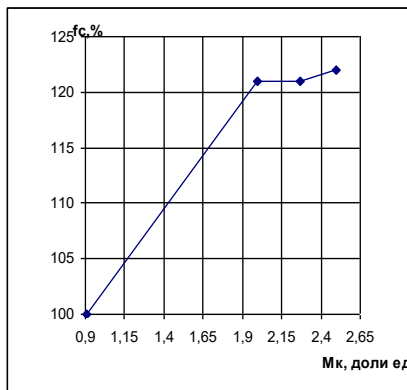
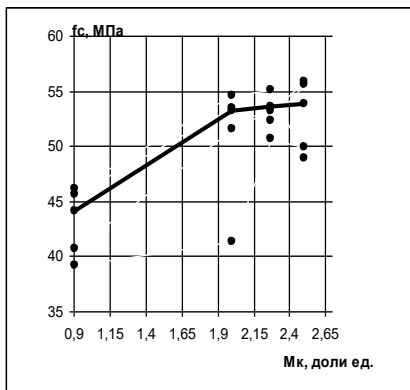


Рис. 2. Тенденция изменений прочности бетона нормально-влажностного твердения в проектном возрасте в зависимости от модуля крупности песка (исходный $M_k=0,91$)

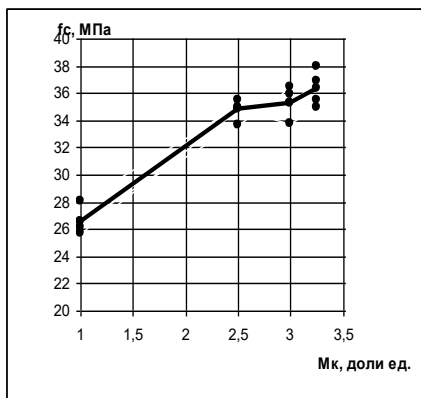
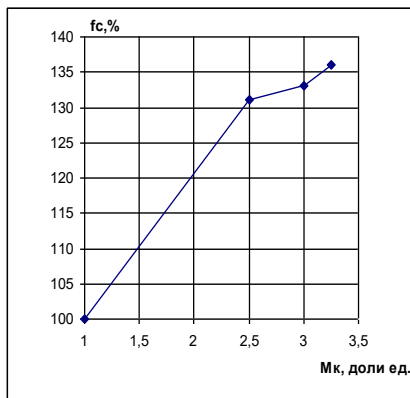


Рис. 3. Тенденция изменений прочности пропаренного бетона в зависимости от модуля крупности песка (исходный песок завода «Спецж/б» $M_k \approx 1,0$)

Чем рациональнее зерновой состав, тем выше качественная характеристика бетона (в данном конкретном случае – прочность на сжатие).

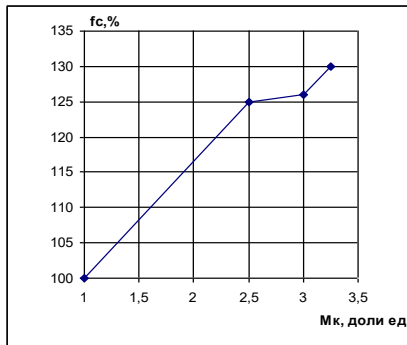
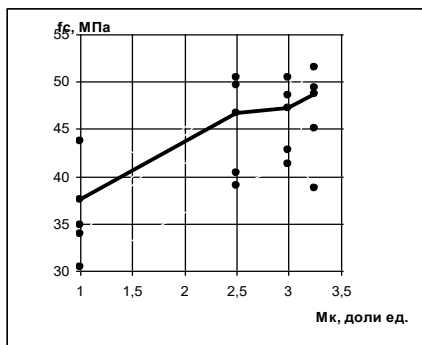


Рис. 4. Тенденция изменений прочности бетона нормально-влажностного твердения в проектном возрасте в зависимости от M_k песка (исходный песок завода «Спецж/б» $M_k \approx 1,0$)

На рост прочности бетона влияет качество поверхности (шероховатости крупных фракций отсева, способствующее росту сил сцепления цементного камня в бетоне с зернами песка). Так, прочность бетона на заполнителе, обогащенном крупными фракциями отсева, уже при модуле крупности $M_k = 2,27$ практически сравнялась с прочностью образцов на высококачественном (мытом) природном песке с $M_k = 3,2$; начиная со значений $M_k = 2,5$ – превысила ее для бетона после тепловлажностной обработки.

Заклучение

Установлен зерновой состав гранитного отсева, характеризующийся содержанием фракций размерами менее 0,63 мм – порядка (52...55) %. Фракции менее 0,63 мм в свою очередь, представлены следующим образом: фракция 0,315 – 0,63 мм – 15 %; фракция 0,14 – 0,315 мм – 17,5 % и менее 0,14 мм – 12 %. Именно эти фракции и, особенно, $\leq 0,315$ способствуют ухудшению свойств отсева как заполнителя для бетона, т.к. они тонкодисперсные, характеризуются развитой удельной поверхностью, наличием микротрещин в структуре и лещадностью зерен.

В результате выполненных исследований разработаны гранулометрические составы обогащенного песка с $M_k = 2,0 \dots 2,5$ от исходного $M_k \leq 1,0$ и $M_k = 2,0 \dots 3,25$ от исходного $M_k = 1,0 \dots 1,5$. Исследовано влияние обогащенного песка на прочность бетона, которая

может быть повышена до (15...20)% при его использовании, а также возможной экономии цемента до (10...20)% при замене тонкого песка ($M_k \leq 1,0$) на обогащенный ($M_k = 2,0...2,5$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона // И.Н. Ахвердов – М.: Стройиздат., 1981. – 464 с: ил
2. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1980.
3. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон / И.Н. Ахвердов – М.: Стройиздат., 1961. – 106 с: ил
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. для студентов ВУЗов строит. спец// Ю.М. Баженов. – 3-е изд., – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с: ил. – ISBN 5-93093-138-0
4. СТБ 1544–2005. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. – введ. 2005 – 07 – 01. – Минск: РУП «Стройтех-норм», 2005, 21 с.
6. ГОСТ 8736–93. Песок для строительных работ. Технические условия. – введ. 1996 – 01 – 01. – Минск: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве.,1995, 15 с.
7. ГОСТ 30459-96. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности. –1998–07–01. – Минск: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве.,1998, 44 с.
8. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. // Основы бетоноведения. Санкт-Петербург: “Строй Бетон”, 2006.
9. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. // Технология за-полнителей бетона. М.: Высшая школа, 1991.
10. Виноградов Б.Н. // Влияние заполнителей на свойства бетонов. М.: Стройиздат, 1979.

Строительная 3D-печать: оборудование, способы формования, сферы применения, особенности бетонокомпозитов

Змушко Д.В., Кохнович Е.С., Скарина О.Н., Мажанова А.И.
Научный руководитель – Самуйлов Ю.Д.

Строительная 3D-печать, основанная на аддитивных технологиях, постепенно входит в строительную индустрию. Данное явление связано с тем фактом, что технология формования элементов зданий и сооружений при помощи строительного 3D-принтера имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами бетонирования. Экономия материальных и временных ресурсов, оперативное и точное создание сложных архитектурных форм строящегося здания – все это помогает аддитивным технологиям найти свое место на современной стройплощадке.

Аддитивными технологиями называется процесс создания реального физического объекта на основе трехмерной компьютерной модели, который представляет собой наращивание необходимой формы путем послойного нанесения материала.

Первыми строительную 3D-печать начали использовать инженеры из Китая, США, Великобритании, Нидерландов и некоторых других стран. Сейчас аддитивной технологией интересуются и в Республике Беларусь. В БНТУ работают над созданием печатного оборудования и технологии устройства стен, перегородок и других архитектурных элементов зданий при помощи строительной 3D-печати.

В данной статье представлены технические решения оборудования для 3D-бетонирования из различных стран мира, примеры применения 3D-печати. Описаны известные способы формования, приведены особенности бетонокомпозитов.

Оборудование для 3d-печати и способы формования

На сегодня в мире создано достаточно большое количество технических решений 3D-принтеров, предназначенных для различных способов формования.

Известные способы формирования элементов зданий и сооружений, при использовании технологии 3D-печати, условно можно разделить на три типа:

1. Послойное формирование несъемной опалубки мелкозернистой фибробетонной смесью с различными модифицирующими добавками, с последующим заполнением полостей опалубки газо- или пенобетоном, либо отвердевающими пенополимерами.

2. Послойное формирование несъемной опалубки отвердевающими пенополимерами, с последующим заполнением полостей опалубки бетонной смесью.

3. Адресное разбрызгивание связующего вещества на послойно наращиваемый объем инертного мелкого заполнителя.

Зарубежные принтеры, реализующие данные способы формования, представлены на рис. 1, (пояснения к рисунку в табл. 1).

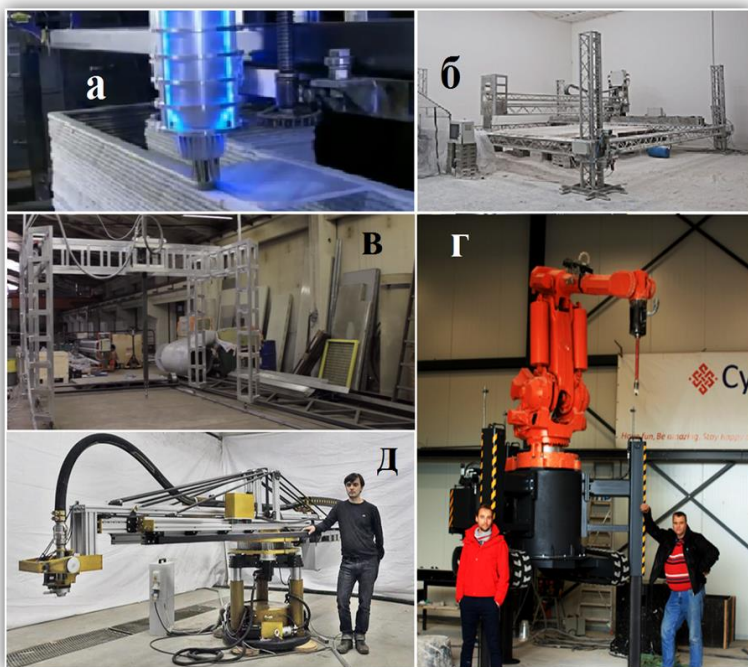


Рис. 1. Примеры 3D-принтеров в зарубежном исполнении

Таблица 1. 3D-принтеры в зарубежном исполнении

Рис.	Название модели	Страна
а	StroyBot	США
б	D-Shape	Франция
в	BetAbram	Словения
г	ProTo R 3Dp	Нидерланды
д	Apis Cor	США-Россия

Впечатляющие успехи в разработке технологии 3D-печати наблюдаются сегодня в России. Организация ООО «СПЕЦАВИА» (Россия, г. Ярославль) выпустила в продажу целую серию строительных 3D-принтеров (рис. 2, пояснения к рисунку в табл. 2), предназначенных для самого широкого спектра работ, начиная производством малых архитектурных форм и заканчивая возведением элементов зданий и сооружений.

Таблица 2. 3D-принтеры ООО «СПЕЦАВИА», РФ

Рис.	Название модели
а	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-2020
б	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-1160
в	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-4063
г	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-6043
д	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-6044
е	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-6044long
ж	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-6044 м
з	принтер строительный трёхмерной печати (3d) s-6045m

Наиболее востребованным в строительной 3D-печати способом формирования является способ первого типа. Именно этот способ реализует большинство технических агрегатов (рис. 3).

Остальные способы формирования распространены значительно меньше и проявлены в единичных случаях (рис. 4, 5).

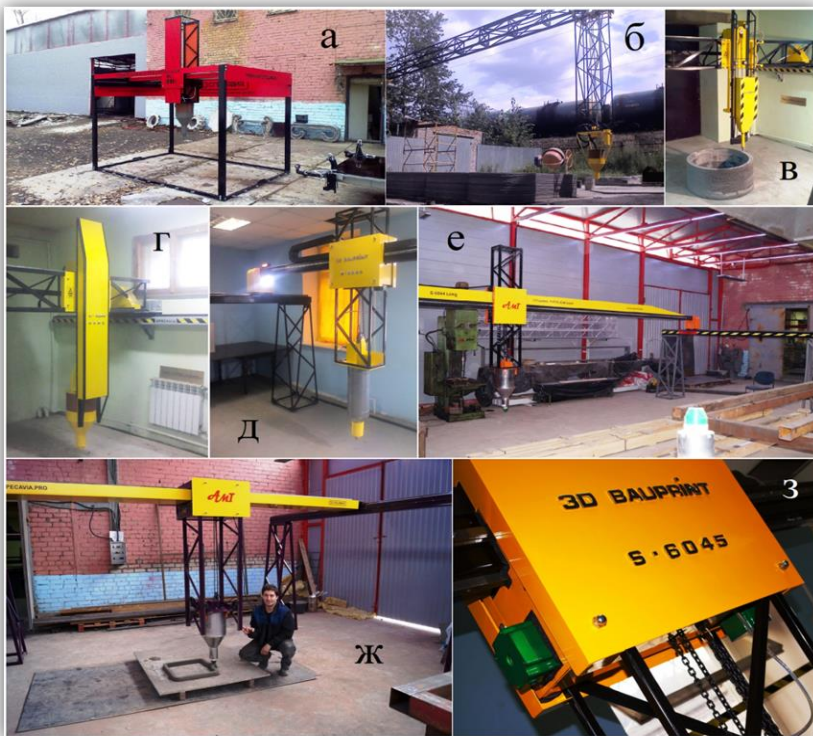


Рис. 2. 3D-принтеры ООО «СПЕЦАВИА», РФ



Рис. 3. Реализация способа формования первого типа при помощи Aris Cor



Рис. 4. Реализация способа формования второго типа при помощи Digital Construction Platform, MIT, США.

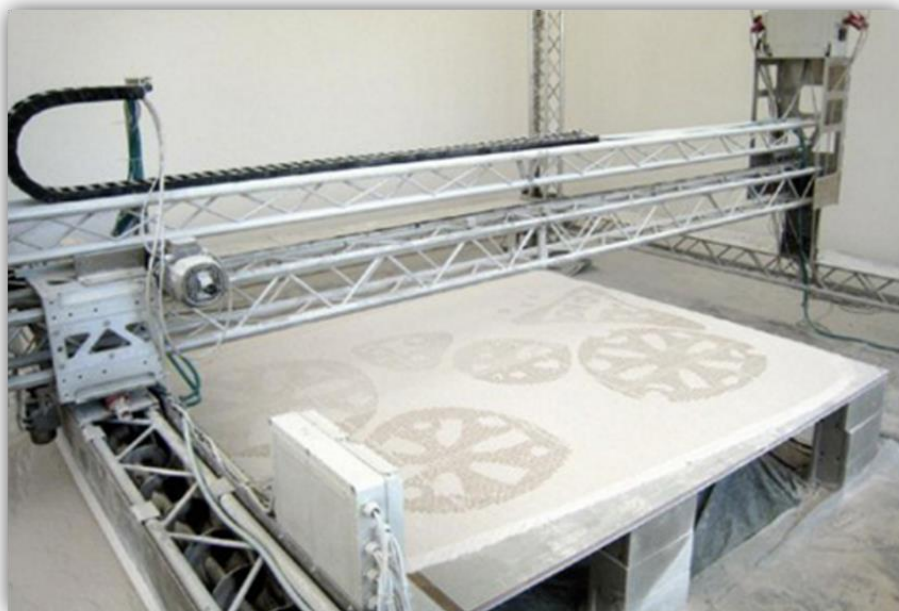


Рис. 5. Реализация способа формования третьего типа при помощи D-Share, Франция.

Примеры выполненных работ

На текущий момент применение строительной 3D-печати зафиксировано при: возведении зданий простых и сложных архитектурных форм, изготовлении сборных элементов зданий и сооружений, производстве малых архитектурных форм и элементов благоустройства, обустройстве интерьеров зданий.

Ниже продемонстрированы примеры работ, выполненных на строительных 3D-принтерах.



Рис. 6.

- а) замок, выполненный с помощью 3D-принтера «StroyBot»;
- б) пример работы с интерьером (пристройка к филиппинской гостинице Lewis Grand Hotel, площадью 130м², с несколькими спальнями, и джакузи), выполненный с помощью 3D-принтера «StroyBot»;
- в) дом, выполненный с помощью 3D-принтера «Apis Cor»;
- г) дом, выполненный с помощью 3D-принтера китайской компании WinSun Decoration Design Engineering Company, собранный из распечатанных блоков.



Рис. 7. Элементы благоустройства, выполненные на строительных 3-D принтерах первым способом формования.



Рис. 8. Малые архитектурные формы, выполненные на строительном 3-D принтере D-Shape третьим способом формования

Особенности способа формирования первого типа

Как уже было сказано, наиболее распространенным на данный момент способом формирования при 3-D печати является способ первого типа. Основные элементы, которые стоит рассмотреть для более глубокого понимания процессов формовки, представлены на рис. 9.

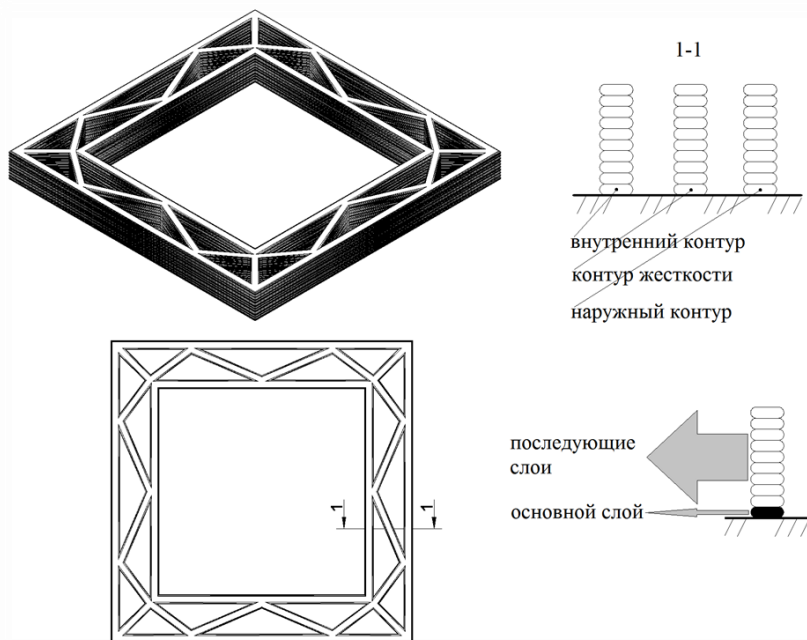


Рис. 9. Основные элементы формируемого объекта при способе формирования первого типа

На рисунке видно, что для формовки объемного тела укладываются три контура: внутренний, наружный, и контур жесткости. Каждый контур состоит из нескольких слоев и укладывается слой за слоем. В этом и состоит суть аддитивных технологий.

Особенности бетонокомпозитов, которые используют в качестве строительного материала при 3-D печати, выражены в: консистенции строительной смеси, ее способностях к пластической деформации

ции и удержанию формы, динамике набора смесью прочности (основной слой должен нести нагрузку от последующих слоев без разрушений и критических деформаций), транспортабельности смеси по подводящим шлангам до места укладки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивная технология: описание, определение, особенности применения и отзывы. Аддитивные технологии в промышленности [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://fb.ru> – Дата доступа: 10.05.2017.

2. Обзорная статья по 3D строительным технологиям [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://geektimes.ru> – Дата доступа: 10.05.2017.

3. Строим дом с помощью 3D-принтера: обзор компаний и перспективы [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://3dtoday.ru> – Дата доступа: 10.05.2017.

4. ООО «СПЕЦАВИА». Официальный сайт [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://specavia.pro> – Дата доступа: 10.05.2017.

5. 3D-принтер VetAbram: недорогое устройство, которое «напечатает» вам дом [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://3dnews.ru> – Дата доступа: 11.05.2017.

6. Топ-6 строительных принтеров для 3D-печати домов [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://robotrends.ru> – Дата доступа: 11.05.2017.

7. Как быстро построить дом из ППУ [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://pmppu.ru> – Дата доступа: 27.10.2017.

8. D-Shape prints the Rygo, the largest 3D print in America [Электронный ресурс], – Режим доступа: <https://www.3dprinter.net> – Дата доступа: 27.10.2017.

Оптимизация минералогического и вещественного состава портландцемента для повышения его сульфатостойкости

Ковальчук К.А.

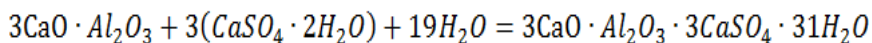
Научный руководитель – Дзабиева Л.Б.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Сульфатная коррозия в цементном камне развивается под влиянием анионов SO_4^{2-} , связанных с катионами Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , содержание которых в условиях эксплуатации может колебаться в широких пределах. В грунтовых водах обычно содержание SO_4^{2-} не превышает 60 мг/л, в морской воде оно может достигать 2500...2880 мг/л. Для бетона нормальной проницаемости на портландцементе сульфаты, содержащиеся в воде-среде, оказывают слабое агрессивное воздействие при концентрации ионов SO_4^{2-} свыше 300 мг/л, а сильное – свыше 500 мг/л.

В таких условиях долговечность бетонов и растворов может быть обеспечена только применением специальных сульфатостойких цементов. Требования к последним формулируются в стандартах не менее 50 стран мира. Вопросам оптимизации минералогического состава портландцемента уделяется внимание ведущих объединений, таких как ASTM International (США), Deutsches Institut für Normung (Германия), Цемяискон (Россия) и др.

Сульфатостойкий портландцемент отличается от обычного портландцемента повышенной стойкостью к действию минерализованных вод, содержащих сульфаты, меньшим тепловыделением, замедленной интенсивностью твердения и высокой морозостойкостью. Он получается при совместном помоле клинкера с гипсом. Минералогический состав клинкера нормирован по содержанию трехкальциевого алюмината и трехкальциевого силиката. Это обусловлено тем, что сульфат кальция реагирует с трехкальциевым алюминатом цемента и связывает его в гидросульфоалюминат кальция (минерал этtringит) согласно следующей химической реакции:



Кристаллизация этtringита сопровождается увеличением объема вступающих в реакцию веществ примерно в 4,76 раза, что приводит к разрушению цементного камня и бетона на его основе.

Все национальные стандарты на сульфатостойкие цементы отвечают требованиям EN 197-1, а что касается специфических показателей, предусматривается деление цементов на цементы с высокой и с умеренной сульфатостойкостью. В зависимости от этого изменяются требования к их минералогическому и вещественному составу.

Цементы первой группы не должны содержать активных минеральных добавок и к ним предъявляются повышенные требования по минералогическому составу клинкера.

Ко второй группе относят цементы, содержащие активные минеральные добавки. В данном случае к клинкеру предъявляют более низкие требования.

Анализ зарубежных стандартов показывает, что в них условием высокой сульфатостойкости цемента является, прежде всего, пониженное содержание C_3A в клинкере и в меньшей степени – пониженное содержание трехкальциевого силиката. Стандарты Великобритании, Германии и Китая допускают содержание C_3A в высокосульфатостойком цементе, равное 3.5, 3.0 и 5.0 соответственно и не нормируют содержание C_3S (кроме Китая).

До последнего времени стандартизация требований к сульфатостойкому портландцементу осуществлялась по ГОСТ 22266-94. Для гармонизации его требований со стандартами ЕС и использования единой терминологической базы и принципов стандартизации фирмой «Цемискон» разработан ГОСТ 22266-2013, введенный в действие с 1 января 2015 года.

Основным отличием нового стандарта от действовавшего ранее является переход на новые обозначения типов цементов в зависимости от их вещественного состава и на классы и подклассы прочности взамен марки цемента.

По [2] предусматривалось производство четырех видов сульфатостойкого цемента: бездобавочного, с минеральными добавками, сульфатостойкого шлакопортландцемента и сульфатостойкого пуццоланового цемента. В новом стандарте предусмотрено производ-

ство всего трех видов цемента: бездобавочного, с минеральными добавками и сульфатостойкого шлакопортландцемента. В соответствии с новой версией стандарта сульфатостойкий цемент без минеральных добавок типа ЦЕМ I СС можно производить двух классов прочности (32,5 и 42,5) и двумя подклассами по скорости твердения – нормальнотвердеющий (Н) и быстротвердеющий (Б).

Введение минеральных добавок в цемент типа ЦЕМ I СС в качестве основного компонента не допускается, как и в цементе ССПЦ Д0, однако в него можно вводить до 5 масс.% минеральной добавки (шлака, пуццоланы, золы-уноса и др.) в качестве вспомогательного компонента.

Изменились требования к минералогическому составу портландцементного клинкера для производства сульфатостойкого цемента без минеральных добавок: содержание C_3A в клинкере теперь не должно превышать 3.5 масс.%, при этом исчезло ограничение по максимальному содержанию C_3S и сумме C_3A+C_4AF . Ранее эти показатели не могли превышать 5, 50 и 22 масс.% соответственно.

Типы по вещественному составу, классы и подклассы по прочности сульфатостойких портландцементов и требования к их вещественному составу по [3] приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Наименование цемента	Тип цемента	Применяемые классы и подклассы прочности	Разрешенные минеральные добавки – основные компоненты
Сульфатостойкий портландцемент	ЦЕМ I СС	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н;42,5Б.	Не допускается
Сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками	ЦЕМ II/A-Ш СС; ЦЕМ II/B-Ш СС.	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н	Доменный гранулированный шлак
	ЦЕМ II/A-П СС		Пуццолана
	ЦЕМ II/A-К (Ш-П) СС; ЦЕМ II/A-К (Ш-П, МК) СС.		Смесь шлака с пуццоланой или микрокремнеземом
Сульфатостойкий шлакопортланд-	ЦЕМ III/A СС	32,5Н; 32,5Б; 42,5Н	Доменный гранулированный шлак

Условное обозначение цемента по [3] должно состоять:

- из наименования цемента по вещественному составу;
- обозначение типа цемента;
- класса и подкласса прочности;
- обозначения сульфатостойкости «СС»;
- обозначения действующего стандарта.

Пример условного обозначения сульфатостойкого портландцемента класса прочности 42,5 быстротвердеющего:

Сульфатостойкий портландцемент ЦЕМ I 42,5Б СС ГОСТ 22266-2013.

Стандартом регламентируются также следующие технические параметры:

Цемент должен выдерживать испытания на равномерность изменения объема: расширение образцов не должно быть более 10мм.

Сроки схватывания сульфатостойких цементов в основном определяются качеством портландцементного клинкера и величиной добавки гипса. Стандартом предусмотрены одинаковые сроки схватывания, как для сульфатостойкого, так и для обычного портландцемента. Начало схватывания цемента должно наступать не ранее 45 минут, а конец – не позднее 10 часов от начала затворения водой. Сроки схватывания сульфатостойкого портландцемента с увеличением тонкости его помола сокращаются.

Сульфатостойкий портландцемент весьма чувствителен к температурным условиям твердения. При температурах около 10-12°C процессы схватывания и твердения значительно замедляются, а при температуре ниже 5°C они почти прекращаются. Наоборот, при повышенных температурах сульфатостойкие портландцементы схватываются и твердеют более интенсивно, чем портландцементы. Поэтому изделия и конструкции из бетона на этом цементе целесообразно подвергать термообработке с помощью пара или электричества при 80-100°C или запаривать в автоклавах при 175-200°C.

Помимо химического и минералогического состава клинкера, на сульфатостойкость цементов существенное влияние оказывает и микроструктура клинкера. Цемент из быстроохлажденного клинке-

ра, содержащего повышенное количество стекловидной фазы и меньше кристаллического C_3A , является более сульфатостойким, чем из клинкера, охлаждение которого происходило медленно.

Улучшает сульфатостойкость цементов пропаривание и в особенности автоклавная обработка. При тепловлажностной обработке цементов в автоклавах кристаллизуются более стойкие гидросиликаты [1].

Первоначально сульфатостойкий цемент использовался для строительства морских портовых сооружений, в настоящее время значение сульфатостойких цементов возросло благодаря широким масштабам строительства подземных и подводных сооружений, железобетонных трубопроводов, промышленных сооружений и др. Сульфатостойкие цементы можно применять без специальной защиты бетонов в средах, содержащих до 4000 мг/л сульфат-ионов.

В России выпуск сульфатостойкого цемента, по предложению В.Н. Юнга, был начат в 1927 г. на Брянском цементном заводе. Содержание трехкальциевого алюмината в этом цементе составляло всего лишь около 3,5%, что было достигнуто благодаря замене глины в составе сырьевой смеси трепелом. Производство сульфатостойкого портландцемента в Республике Беларусь становится более перспективным в связи с разведанным на ее территории месторождением трепела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.И. Дворкин Строительные минеральные вяжущие материалы/ Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин – М.: Инфра-Инженерия, 2011 с.542
2. ГОСТ 22266-94. Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
3. ГОСТ 22266-2013. Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
4. Энтин З.Б. О разработке новых стандартов на цементы. Цемент и его применение, 2011, №6 – с.34-37
5. Сивков С.П. Новый стандарт на сульфатостойкие цементы: рекомендации для производителей и потребителей. Цемент и его применение, 2015, №1 –с.56-58