

Наведено результати дослідження реакційних порошкових бетонів, для отримання яких використано в якості дрібного заповнювача суміші річкового піску та техногенного піску, отриманого внаслідок переробки гірських порід, які містять сполуки заліза. Встановлено, що застосування суміші річкового та техногенного піску, який містить сполуки заліза, дозволяє отримати бетон, міцність якого при стиску перевищує міцність бетону аналогічного складу, виготовленого із використанням тільки річкового піску, або тільки техногенного піску

Ключові слова: реакційний порошок бетон, дрібний заповнювач, сполуки заліза, пластифікатори, міцність бетону

Приведены результаты исследования реакционных порошковых бетонов, для получения которых использована в качестве мелкого заполнителя смесь речного песка и техногенного песка, полученного в результате переработки горных пород, содержащих соединения железа. Установлено, что применение смеси речного и техногенного песка, который содержит соединения железа, позволяет получить бетон, прочность которого при сжатии превышает прочность бетона аналогичного состава, приготовленного с использованием только речного песка или только техногенного песка

Ключевые слова: реакционный порошок бетон, мелкий заполнитель, соединения железа, пластификаторы, прочность бетона

ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

А. А. Шишкин

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: 5691180@gmail.com

Н. И. Нетеса

Доктор технических наук, профессор

Кафедра строительного производства и геодезии

Днепропетровский национальный

университет железнодорожного транспорта

ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010

E-mail: andreynetesa@meta.ua

В. В. Щерба

Кандидат технических наук*

E-mail: 5691180@gmail.com

*Кафедра технологии строительных изделий, материалов и конструкций

Криворожский национальный университет

ул. В. Матусевича, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

1. Введение

Современные бетоны, в том числе реакционные порошковые, представляют собой многокомпонентную композиционную систему. В своем вещественном составе они содержат заполнитель и тонкодисперсный наполнитель, портландцемент, минеральные и минерально-органические добавки. Эти добавки обеспечивают низкую водопотребность и необходимые реологические свойства бетонным смесям, способствуют их уплотнению и формированию прочной структуры бетона при его твердении.

В традиционных бетонах мелкий заполнитель, в качестве которого чаще всего используют речной песок, занимает значительный объем. Еще больший расход песка требуется при производстве бетонов нового поколения – реакционно-порошковых, в составе которых отсутствует крупный заполнитель.

В связи с ростом цен на песок, применяемый в строительстве, существует потребность в изыскании экономичных и рациональных приемов использования местного сырья для производства бетонов, в том числе и реакционных порошковых. Дополнительным, усугубляющим фактором, склоняющим к этим решениям, является постоянно увеличивающиеся затраты на транспортирование материалов и сырья к месту строительства.

Другой проблемой, сдерживающей широкое распространение перспективных технологий, является необходимость применения специальных дефлокуляторов и пластификаторов – химических поверхностно-активных веществ.

Учитывая полифункциональные действия современных дефлокулянтов и пластификаторов, актуальной задачей по дальнейшему совершенствованию и развитию технологии бетонов является направленное регулирование процессов структурообразования цементного камня. Это достигается путем совместного использования современных дефлокулянтов и пластификаторов, а также техногенных заполнителей и наполнителей бетона.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время наиболее широко распространенными материалами техногенного происхождения, которые имеют фракционный состав, позволяющий использовать их в качестве мелкого заполнителя бетонов, являются отходы горно-обогатительных комбинатов (так называемые «хвосты» обогащения железных руд).

Проведенные в середине двадцатого столетия исследования [1], явились основанием для использования «хвостов» обогащения железных руд в качестве

мелких заполнителей бетона и дальнейших исследований в этом направлении [2–5].

В данных работах приведены результаты исследований бетонов различного вида, с использованием «хвостов» обогащения железных руд в качестве заполнителей. Так, в работе [2] описаны результаты исследований тяжелых бетонов на портландцементе, при производстве которых в качестве мелкого заполнителя применялись «хвосты» обогащения железных руд. В работе [3] приведены результаты исследования бетонов на цементогипсопудцолоновом вяжущем, при производстве которых в качестве мелкого заполнителя применялись «хвосты» обогащения железных руд. В работе [4] показаны свойства бетонов с использованием тонкодисперсной части «хвостов» обогащения железных руд.

В работе [5] показана эффективность использования «хвостов» обогащения железных руд в качестве заполнителей ячеистого бетона. Данная работа отличается тем, что в ней рассмотрен вопрос совместного использования поверхностно-активных веществ и «хвостов» обогащения железных руд в качестве заполнителей ячеистого бетона. В работе [6] показано влияние различных минеральных комплексов на свойства цементного бетона, однако смеси этих комплексов в исследованиях не применялись, по крайней мере, в работе нет данных о таких исследованиях.

В работах [7, 8] приведены исследования влияния смеси минеральных комплексов, в качестве заполнителей бетона на его свойства. Однако в этих работах не исследовалось применение минеральных комплексов, аналогичных по минералогическому составу «хвостам» обогащения железных руд.

Установлены закономерности обеспечения рационального зернового состава компонентов бетонной смеси для повышения эффективности использования цемента в бетонах и улучшения его физико-механических свойств [9]. Это позволило выявить и важные закономерности по применению как суперпластификаторов, так и простейших пластификаторов [10] в технологии бетона.

Таким образом, исследования возможности замены традиционного речного песка отходами обогащения железных руд, освещенные в работах [1–5], заключались в изучении свойств бетонов и растворов, в которых, основываясь на выводах, полученных в работе [1], была произведена полная замена речного песка на «хвосты» обогащения железных руд. В работе [1] показаны результаты исследований крупнозернистого бетона, в котором часть речного песка заменялась отходами обогащения железных руд. Как показали результаты исследований, приведенных в работе [1], увеличение прочности бетона происходит пропорционально содержанию отходов обогащения железных руд в заполнителе и достигает максимума при полной замене речного песка отходами обогащения железных руд. Однако следует отметить, что данные исследования производили для крупнозернистого бетона, а не для мелкозернистого. Результаты указанных исследований [1] позволили авторам сделать следующие выводы:

1) «хвосты» обогащения железных руд для использования в качестве мелкого заполнителя бетона следует «классифицировать» – выделять из их состава

фракцию менее 0,14 мм, которая составляет около 70 % «хвостов»;

2) для обеспечения наибольшего повышения прочности бетона следует речной песок полностью заменять «хвостами» обогащения железных руд.

Степень изученности в работе [1] свойств бетонов, в которых в качестве мелкого заполнителя использовали «классифицированные» «хвосты» обогащения железных руд, позволила разработать нормативный документ на их применение – ДСТУ Б В.2.7-33-2001 «Строительные материалы. Песок кварцево-железистый и тонкодисперсная фракция для строительных работ из отходов горно-обогатительных комбинатов Украины. Технические условия». Вопрос же масштабного использования тонкодисперсной фракции «хвостов» обогащения железных руд (размером частиц менее 0,14 мм) до настоящего времени должным образом не решен.

Таким образом, на сегодняшний день практически не определено совместное влияние на свойства мелкозернистых бетонов речного песка и минеральных комплексов, содержащих железо, в том числе техногенного происхождения, а также поверхностно-активных веществ. Это обуславливают необходимость проведения исследований в этом направлении.

3. Цель и задачи исследований

Целью настоящей работы является определение особенности формирования прочности мелкозернистого бетона в присутствии минеральных комплексов, содержащих железо, в виде части мелкого заполнителя и наполнителя бетона и пластификаторов различного вида.

Для достижения поставленной цели решалась следующая задача: установить особенности влияния совместно введенных в бетон минерального комплекса, содержащего железо техногенного происхождения, речного песка и пластификаторов, в том числе современных суперпластификаторов, на величину прочности бетона.

4. Материалы и методы исследований

4. 1. Материалы и оборудование, использованные в экспериментах

Для оценки потенциальной возможности использования «хвостов» обогащения железных руд для создания различных строительных материалов авторами были исследованы составы вяжущих, приготовленных добавлением активизирующих добавок к «хвостам» обогащения железных руд Криворожского железорудного бассейна. В качестве активизирующих добавок использовали портландцемент марок 500 и 400 (производитель «Хайдельберг цемент Кривой Рог»), известность строительную активностью 85 %, растворимое стекло. Для улучшения удобоукладываемости использованы суперпластификатор «FLVICEM» итальянской фирмы «COLMEF», рекомендуемый расход которого составляет 0,5...1,5 % от массы цемента, суперпластификатор органического происхождения С-3, суперпластификатор ПФС («Полипласт», РФ) и полиспирт (Украина).

Состав продуктов гидратации вяжущих, приготовленных добавлением активизирующих добавок к «хвостам» обогащения железных руд, исследовали методами рентгенофазового (РФА) и дифференциального термического анализ (ДТА).

4. 2. Методика определения показателей свойств образцов

Исследуемые составы готовили путем смешивания расчетного количества компонентов с последующим добавлением воды. Образцы из рабочих смесей изготавливали способами литья.

Образцы представляли собой кубы с размером сторон 15 см. После приготовления образцы твердели в условиях климатической камеры, в которой поддерживалась температура $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ при относительной влажности $(65 \pm 5)\%$.

В возрасте 28 суток образцы подвергали испытанию на сжатие. Усилия сжатия создавались универсальной испытательной машиной УММ-100 (производитель РФ). Прочность бетона определялась как частное от деления величины нагрузки, при которой произошло разрушение образца, на величину площади его поперечного сечения.

5. Результаты исследования показателей свойств бетонных образцов

Результаты ДТА показали (рис. 1), что введение в «хвосты» обогащения железных руд цемента и извести качественно меняет характер компонентов системы.

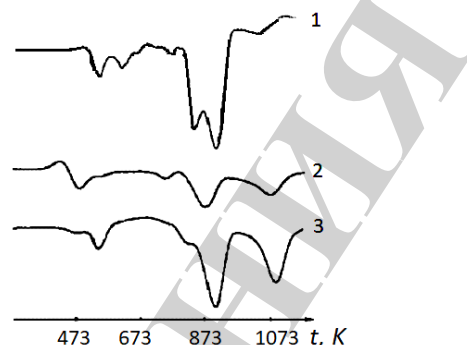


Рис. 1. Результаты ДТА: 1 – исходные «хвосты» обогащения железных руд, 2 – «хвосты» обогащения железных руд + 10 % портландцемента + 10 % извести, 3 – «хвосты» обогащения железных руд + 10 % портландцемента + 15 % извести

Рентгенофазовый анализ (рис. 2, 3) показал, что в затвердевшей смеси «хвостов» обогащения железных руд, цемента и извести сохраняются в виде заполнителя зерна пирита (d : 0,312; 0,270; 0,242; 1,50 нм) и кварца (d : 3,34; 1,81; 1,54 нм), но образуются и новые вещества.

В табл. 1 представлены результаты испытаний контрольных образцов бетона в 28-суточном возрасте нормального твердения с различными расходами цемента. В качестве наполнителя использованы «хвосты» обогащения железных руд, 90 % зерен которых соизмеримы с размером зерен цемента. Применялся также шлакопортландцемент активностью 40 МПа, гранитный щебень максимальной крупностью 20 мм и днепропетровский песок с модулем крупности 1,45.

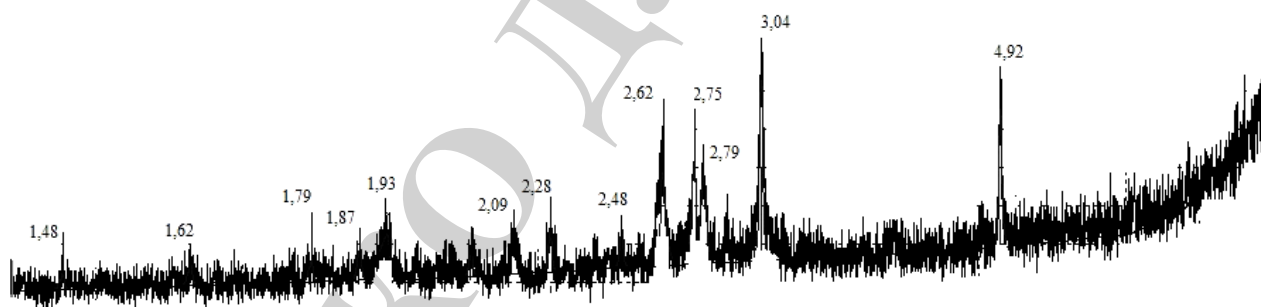


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа: исходные «хвосты» обогащения железных руд

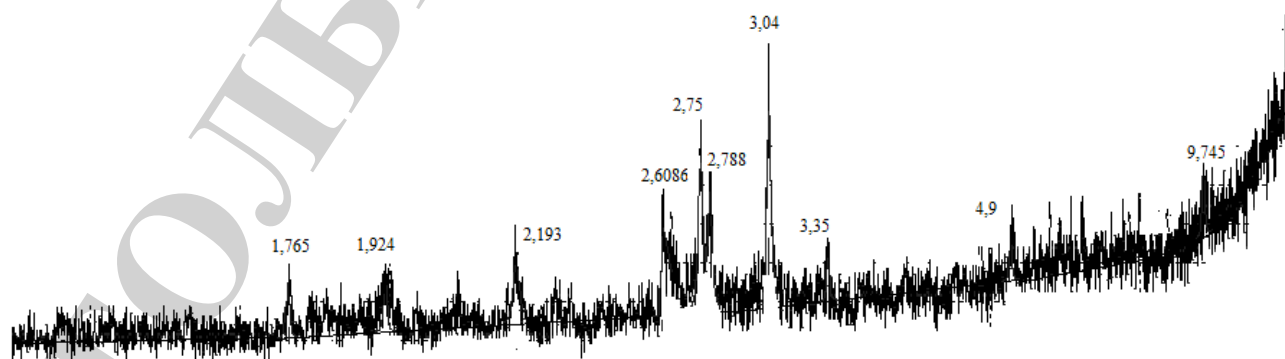


Рис. 3. Результаты рентгенофазового анализа: «хвосты» обогащения железных руд + 10 % портландцемента + 10 % извести

Таблица 1
Составы и результаты испытания контрольных образцов

№ со- става	Расход материалов на м ³ , кг					Прочность, МПа
	Ц	Н	Щ	П	В	
1	125	375	1200	570	170	19,8
2	250	250	1200	570	170	37,2
3	125	125	1200	820	160	12,9
4	125	–	1200	900	170	9,8
5	250	–	1200	820	170	29,8
6	120	360	1200	520	200	15,3
7	100	380	1200	520	200	13,8
8	75	400	1200	520	200	9,3

Примечания: Ц – цемент; Н – наполнитель; Щ – щебень;
П – песок; В – вода

В табл. 2 представлены результаты испытаний образцов бетона в 28-суточном возрасте нормального твердения с различными расходами цемента и добавкой пластификатора ПФС.

Таблица 2
Составы и результаты испытания контрольных образцов бетона с варьированием наполнителя из хвостов обогащения железных руд, добавка ПФС

№ сое става	Расход материалов на м ³ , кг						Прочность, МПа
	Ц	Н	Щ	П	В	ПФС, %	
1	125	–	1250	875	150	0,5	5,92
2	250	–	1250	750	130	0,5	25,8
3	375	–	1250	625	115	0,5	47,1
4	500	–	1250	500	130	0,5	61,5
5	125	125	1250	750	130	0,5	18,8
6	125	375	1250	500	120	0,5	20,5
7	250	125	1250	625	115	0,5	41,0
8	250	250	1250	500	120	0,5	43,2
9	375	125	1250	500	130	0,5	53,5

Примечания: Ц – цемент; Н – наполнитель; Щ – щебень;
П – песок; В – вода

На рис. 4–9 изображены номограммы плотности, скорости ультразвука и прочности бетона от расхода наполнителя и пластификатора при постоянном содержании воды. Номограммы получены в результате статистической обработки результатов выполненных экспериментов и определения математических зависимостей величин плотности, скорости ультразвука и прочности бетона от расхода наполнителя и пластификатора при постоянном содержании воды.

На рис. 10. приведены зависимости прочности бетона от содержания хвостов» обогащения железных руд и пластификатора – полиспирта.

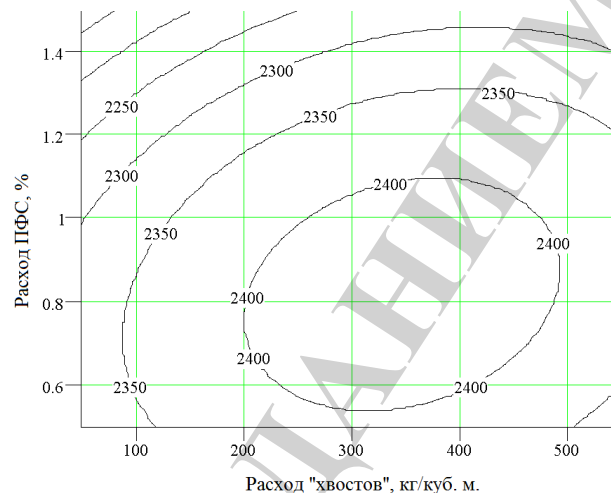


Рис. 4. Зависимости плотности бетона от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 125 л/м³

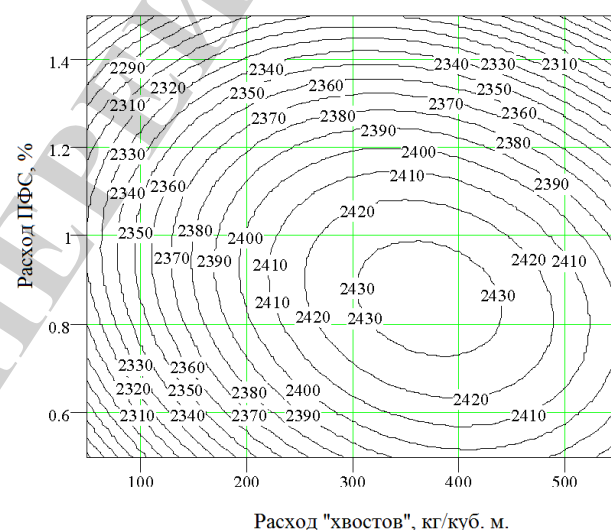


Рис. 5. Зависимости плотности бетона от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 140 л/м³

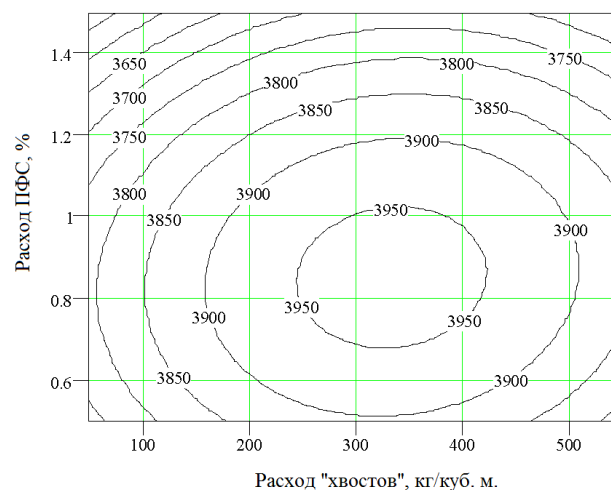


Рис. 6. Зависимости скорости ультразвука от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 125 л/м³

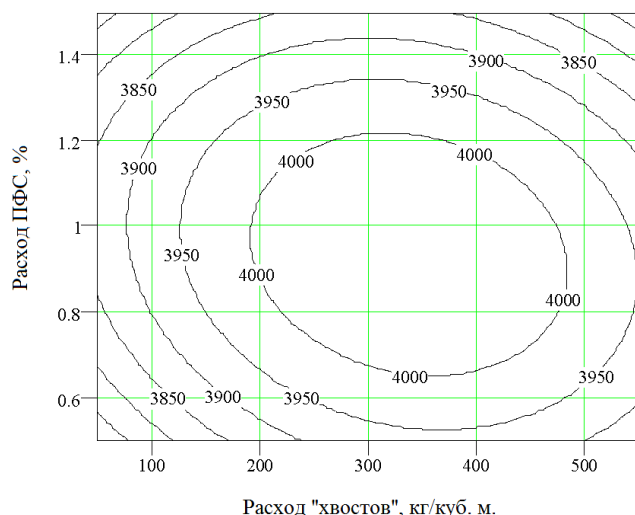


Рис. 7. Зависимости скорости ультразвука от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 140 л/м³

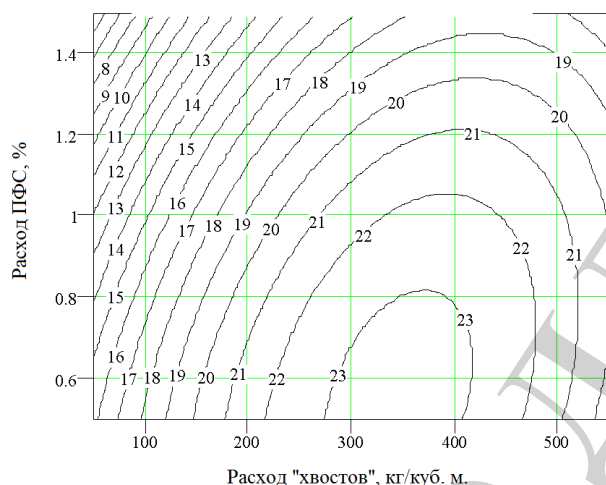


Рис. 8. Зависимости прочности от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 125 л/м³

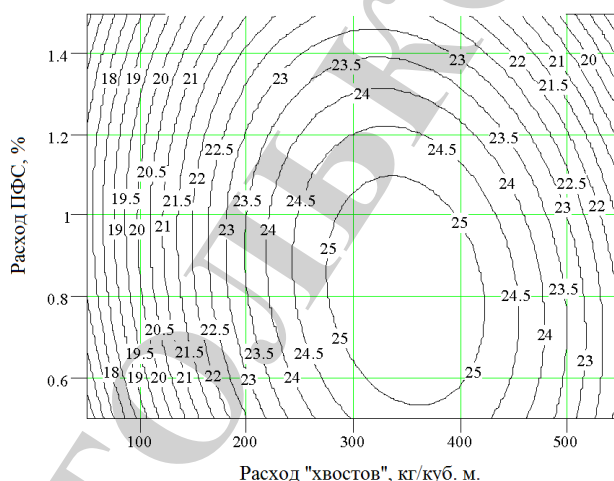


Рис. 9. Зависимости прочности от расхода «хвостов» обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды 140 л/м³

6. Обсуждение результатов исследований свойств композиций, содержащих «хвосты» обогащения железных руд

Введение в «хвосты» обогащения железных руд портландцемента и извести изменяет вид новообразований, о чем свидетельствуют следующие данные. Во-первых, уменьшилось количество гидратной воды в соединениях железа (эндотермические эффекты при температурах 110, 170, 230 °С, эффект при 140 °С исчез), что, очевидно, связано с уменьшением степени окисления пирита (потери массы при эндотермических эффектах при температурах 470, 585, 620 °С уменьшились соответственно в 3,1; 6,5 и 42 раза). Причем эндозффект с 680 °С сместился на 620 °С. Во-вторых, состав, содержащий в качестве активирующей добавки смесь портландцемента и извести, приобрел прочность 9,5 МПа за счет практически полного связывания извести и цемента в гидросиликаты кальция (эндотермические эффекты при температурах 110, 170, 680–820 °С) и карбонаты кальция (эндозффект при температуре 860 °С, именно кальцит (d: 0,387; 0,303; 0,250; 0,228 нм). В данном случае эндозффект при температуре 550 °С, относящийся к свободному гидроксиду кальция, почти не проявляется на дифференциальной термогравиметрической (ДТГ) кривой, но на рентгенограмме гидроксид кальция обнаруживается (d: 0,492; 0,312; 0,263 нм)

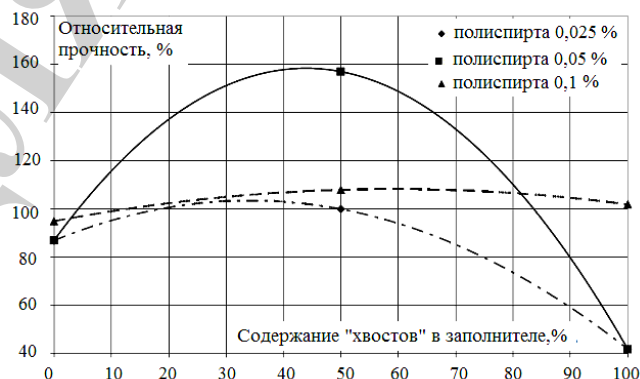


Рис. 10. Влияние содержания «хвостов» обогащения железных руд на прочность бетона при сжатии в присутствии полиспирта

Эндотермический эффект в интервале температур 680–820 °С может быть отнесен к разложению продуктов взаимодействия цемента и извести с составляющими «хвостов» обогащения железных руд. В то же время этот эффект аналогичен эффекту в шлакопортландцементе, хотя потери массы при нем незначительны.

Состав, содержащий добавку цемента и увеличенную до 15 % добавку извести, имеет практически те же эндотермические эффекты.

Результаты ДТА показали, что при добавлении к «хвостам» обогащения железных руд цемента и извести эффекты на кривой ДТА данного состава более четкие и потери массы при эффектах составляют до 93 % от общих потерь массы, в то время как потери массы при эффектах состава без извести не достигают 90 %. Следовательно, в данном составе находится меньше гелевидных составляющих. Особенностью со-

става с увеличенным содержанием извести является повышение основности гидросиликатов кальция (перемещение эндоэффекта с 110 на 140 °С) а также появление видимого эндоэффекта при 550 °С, принадлежащего гидроксиду кальция с потерями массы в 1,5 %, и соответствующее увеличение содержания карбонатов (930 °С). Кроме этого, значительно усилился эндоэффект при 780 °С.

Следующий состав представлял собой «хвосты» обогащения железных руд, затворенные жидким стеклом, поэтому цементирующие новообразования представлены продуктами взаимодействия железосодержащих минералов и силикатов натрия. Особенно этого взаимодействия проявились в уменьшении потерь массы при эндоэффекте при 470 °С почти в два раза по сравнению с предыдущими составами. А также, в увеличении потерь массы в 1,5–2,0 раза по сравнению с составами с цементно-известковой активизацией при третьем эндоэффекте. Одновременно сместились температуры эффекта с 680 до 620 °С.

Кроме того, в данной системе образуется рибекит $\text{Na}_2 \cdot \text{Fe}^{2+} \cdot \text{Fe}^{3+} \cdot \text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$ (d: 0,309; 0,253; 0,217; 0,166; 0,131 нм), а также шабазит $\text{Na}_2 \cdot [\text{Al}(\text{Fe}) \cdot \text{Si}_2\text{O}_6]_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (d: 0,93; 0,435; 0,362; 0,324; 0,293 нм).

Проведенные исследования показали, что «хвосты» обогащения железных руд при активизации их известью или цементом позволяют получить материал прочностью до 10 МПа, при активизации силикатами натрия – до 40 МПа, а при активизации силикатами натрия и техногенными стеклами – до 60 МПа. Роль вяжущего в таких материалах выполняют активизаторы твердения и дисперсные составляющие «хвостов». Проведенные исследования новообразований при твердении составов активизированных «хвостов» обогащения показывают возможность получения на их основе достаточно прочных материалов.

Анализ результатов эксперимента по введению в состав бетона в качестве наполнителя «хвостов» обогащения железных руд (табл. 1), а также визуальные наблюдения, позволяют определить следующие закономерности. Эффективность используемого в этом эксперименте суперпластификатора «FLVICEM», расход которого составлял 1,5 % от массы цемента, значительно выше примененных в других экспериментах суперпластификаторов СЗ и ПФС. Однако в составах без наполнителя, даже при использовании такого эффективного суперпластификатора, получить хорошую удобоукладываемость смеси не удалось. Наблюдалось значительное водоотделение в этих составах № 4, 5, (табл. 1).

Аналогичная закономерность наблюдалась и по составу № 3, расход наполнителя в котором 125 кг. Хорошо уплотнить образцы из этих составов не удавалось. Но коэффициент эффективности использования цемента в этих составах оставался значительно ниже, чем в составах с таким же расходом цемента и рациональным зерновым составом компонентов, который обеспечивался введением необходимого количества наполнителя (табл. 1).

Составы с низким расходом цемента и суперпластификатором «FLVICEM» имели значительно лучшую удобоукладываемость и связность, чем с СЗ и ПФС. Прочность бетона, полученного из этих составов, существенно выше, чем из составов с таким же расходом цемента и примерно такой же удобоукладываемости, но без суперпластификатора. Это же относится и к составам, содержащим суперпластификатор ПФС и значительно более жестким смесям (см. состав № 1, табл. 2).

Анализом результатов исследований, приведенных на рис. 3–8, определены следующие закономерности. Как при расходе воды 125, так и 140 литров на кубометр наибольшие плотность, скорость ультразвука и прочность бетона определены при расходе наполнителя 300...400 кг/м³ и расходе пластификатора 0,7...1,2 % от массы цемента. Но эти характеристики несколько лучше при расходе воды 140 л/м³ бетона.

Интенсивность уменьшения плотности, скорости ультразвука, прочности по мере уменьшения расхода наполнителя 200...50 кг/м³ и увеличения расхода пластификатора 1,2...1,5 % от массы цемента примерно одинакова. Так, наибольшая прочность составляет 25 МПа, а по мере уменьшения расхода наполнителя в исследуемом диапазоне она снижается до 18 МПа при постоянном расходе пластификатора. А при уменьшении содержания последнего до 0,5 % или увеличении до 1,5 % прочность бетона снижается еще больше и составляет 16 МПа. По мере увеличения содержания наполнителя до предельного (550 кг) прочность бетона также снижается, но менее существенно, чем при его уменьшении до 50 кг/м³ бетона. От расхода пластификатора в исследуемых пределах прочность зависит значительно менее существенно, чем от содержания наполнителя.

Закономерности изменения прочности при постоянном содержании воды 125 л на кубометр примерно такая же, как детально рассмотренная выше при содержании воды 140 л. Но прочность бетона во всем диапазоне изменения расхода наполнителя и пластификатора существенно ниже.

Наименьшая прочность определена при содержании воды 125 л, наполнителя 50 кг/м³ бетона, а пластификатора 1,5 % от массы цемента. Визуальными наблюдениями установлено, что бетонная смесь имеет наилучшие технологические характеристики при расходе наполнителя 300...400 кг/м³ и расходе пластификатора 0,7...1,2 % от массы цемента. Ни один из этих компонентов в отдельности не может обеспечить такие же хорошие удобоукладываемость и нерасслаиваемость бетонной смеси, отсутствие водоотделения, хорошее и быстрое заполнение формы. Образцы из такой смеси имеют хорошую гладкую поверхность.

Однако, как показали результаты исследований (рис. 9), если производить не полную замену речного песка рядовыми «хвостами» обогащения железных руд, а лишь некоторую его часть особенно в присутствии полиспирта, можно добиться даже значительного увеличения прочности мелкозернистых бетонов. При этом исключается технологическая операция так называемой «классификации» «хвостов» обогащения железных руд, т. е. используются все фракции «хвостов».

Однако, как показали результаты исследований (рис. 9), если производить не полную замену речного песка рядовыми «хвостами» обогащения железных руд, а лишь некоторую его часть особенно в присутствии полиспирта, можно добиться даже значительного увеличения прочности мелкозернистых бетонов. При этом исключается технологическая операция так называемой «классификации» «хвостов» обогащения железных руд, т. е. используются все фракции «хвостов».

Однако, как показали результаты исследований (рис. 9), если производить не полную замену речного песка рядовыми «хвостами» обогащения железных руд, а лишь некоторую его часть особенно в присутствии полиспирта, можно добиться даже значительного увеличения прочности мелкозернистых бетонов. При этом исключается технологическая операция так называемой «классификации» «хвостов» обогащения железных руд, т. е. используются все фракции «хвостов».

Однако, как показали результаты исследований (рис. 9), если производить не полную замену речного песка рядовыми «хвостами» обогащения железных руд, а лишь некоторую его часть особенно в присутствии полиспирта, можно добиться даже значительного увеличения прочности мелкозернистых бетонов. При этом исключается технологическая операция так называемой «классификации» «хвостов» обогащения железных руд, т. е. используются все фракции «хвостов».

7. Выводы

Проведенными исследованиями влияния техногенных заполнителей мелкозернистого бетона, содержащих железо, совместно с пластификаторами различного вида установлено, что такие техногенные заполнители бетона вступают во взаимодействие с ми-

нералами и продуктами гидратации портландцемента. Это определяет механическую прочность цементного камня и, как следствие, прочность бетона.

Проведенными исследованиями показана возможность направленного регулирования процессов формирования прочной структуры мелкозернистых бетонов путем совместного использования минерального комплекса, содержащего ионы железа, речного песка и поверхностно-активных веществ, которые существенно отличаются структурой молекул.

Доказано, что имеется оптимальное соотношение между речным песком и минеральным комплексом, содержащим ионы железа, которое обеспечивает максимальную прочность мелкозернистого бетона.

Эффективность использования современных суперпластификаторов в мелкозернистых бетонах значительно повышается при обеспечении рационального зернового состава компонентов бетонной смеси, в частности введением в составы минеральных комплексов, содержащих ионы железа.

Литература

1. Пухальский, Г. В. Свойства бетонов на песках из отходов горно-обогатительных комбинатов [Текст] / Г. В. Пухальский, Г. Н. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 1975. – № 5.
2. Бондаренко, С. В. Використання відходів гірничо-збагачувальних комбінатів та їх стандартизація [Текст] / С. В. Бондаренко, В. И. Большаков, Г. Н. Бондаренко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2001. – Вып. 12. – С. 215–217.
3. Шишкин, А. А. Особенности использование отходов горно-обогатительных комбинатов в производстве строительных материалов [Текст] / А. А. Шишкин, А. А. Шишкина, В. В. Щерба // Вісник ДНАБА. – 2013. – № 1 (99). – С. 8–12.
4. Вандоловский, А. Г. Міцнісні властивості особливодрібнозернистого бетону на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів у ролі заповнювача [Текст] / А. Г. Вандоловский, В. М. Чайка // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – Вип. 160. – С. 17–24.
5. Приходько, А. П. Ячеистые бетоны с использованием техногенных отходов промышленности [Текст] / А. П. Приходько, Д. О. Маляр // Вісник ПДАБА. – 2009. – № 4. – С. 5–7.
6. Voglis, N. Limestone, fly ash, slag, and natural pozzolana: a comparative study of their effect on the cement properties [Text] / N. Voglis, S. Tsvilis, G. Kakali // Creating with Concrete: International Conf, 1999: Proc. – Dundee, 1999. – P. 203–210.
7. Erdem, T. K. Use of binary and ternary blends in high strength concrete [Text] / T. K. Erdem, Ö. Kırca // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22, Issue 7. – P. 1477–1483. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026
8. Li, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂ [Text] / G. Li // Cement and Concrete Research. – 2004. – Vol. 34, Issue 6. – P. 1043–1049. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.013
9. Нетеса, Н. И. Влияние зернового состава компонентов на структуру, прочность и морозостойкость бетонов [Текст] / Н. И. Нетеса // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2002. – Вып. 16. – С. 100–107.
10. Shishkin, A. Low-Shrinkage Alcohol Cement Concrete [Text] / A. Shishkin, A. Shishkina, N. Vatin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 633-634. – P. 917–921. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.633-634.917