

doi: 10.5862/MCE.62.1

Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента

Influence of mechanochemical activation on the cement hydration features

Канд. техн. наук, доцент Р. А. Ибрагимов,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

Без степени, ассистент С. И. Пименов,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет, postaddress

R. A. Ibragimov,

Kazan State University of Architecture and Engineering, postaddress

S.I. Pimenov,

Kazan State University of Architecture and Engineering, postaddress

Ключевые слова: измельчение, механохимическая активация, роторно-пульсационный аппарат, суперпластификатор, цементная суспензия, тяжелый бетон

Key words: grinding, mechanochemical activation, rotary pulsation apparatus, superplasticizer, cement slurry, heavy concrete

Аннотация. Наряду с введением различных добавок в состав бетонной смеси, перспективным методом повышения физико-механических свойств цементных бетонов является активация вяжущего. В данной работе представлены результаты влияния механохимической активации цементной суспензии на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства тяжелого бетона. Выявлены показатели поровой структуры тяжелого бетона, морозостойкость, коэффициент сульфатостойкости исследуемых цементных композиций. Показано, что морозостойкость тяжелого бетона, полученного механохимической активацией вяжущего, увеличивается в 3 раза (до марки F600), что обусловлено понижением общей пористости на 39 %, снижением капиллярной пористости на 74,8 % и повышением доли закрытых пор на 53 % по сравнению с контрольным составом. Методами рентгенофазового анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии получено, что фазовый состав цементного камня в возрасте 1 суток нормальновлажностного твердения, полученного механохимической активацией вяжущего, характеризуется повышенным содержанием гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (на 12 %), повышенным содержанием этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) – на 13 %, а также наименьшим содержанием исходных фаз портландцементного клинкера (на 16 %). Это обуславливает высокие физико-механические показатели получаемых композитов. Получение цементных бетонов с высокими темпами твердения позволит снизить время выдержки бетона в опалубке, сократить или вовсе отказаться от тепловой обработки, что является актуальным в условиях энерго- и ресурсосбережения.

Abstract. Nowadays along with the usage of various additives to the concrete mix, the activation of the binder is a promising method to enhance the physical and mechanical properties of the cement concrete. The given paper presents the results of the influence of a mechanochemical activation of cement slurry on the technological properties of the concrete mix and physico-mechanical properties of heavy concrete. The figures of a pore structure of heavy concrete, frost resistance and the coefficient of sulphate cement compositions have been obtained. It is shown that the severe frost resistance of concrete prepared by means of a mechanochemical activation of the binder increases by three times (to the mark F600). This is due to a decrease in the total porosity of 39%, a decrease in capillary porosity of 74.8% and the proportion of closed pores increase by 53% in comparison with the control composition. X-ray diffraction and differential scanning calorimetry investigations have shown that the phase composition of cement paste at the age of 1 day, normal-humidity hardening, obtained by means of a mechanochemical activation of the binder is characterized by a high content of calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (12 %), high content of ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) – 13 %, and the lowest content of the initial phases of Portland cement clinker (16%), which causes high physical and mechanical properties of the resulting composite. The production

Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Vliyanie mehanohimicheskoy aktivacii na osobennosty processov gidratatsii cementa [Influence of mechanochemical activation on the features in the of hydration of cement]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 3-12. doi: 10.5862/MCE.62.1

of cement concrete with a high rate of hardening will reduce the holding time of the concrete in the formwork, to reduce or eliminate the heat treatment, which is relevant in terms of efficient use of energy and resources.

Введение

Одним из перспективных методов повышения физико-механических свойств цементных композиций является активация вяжущего [1–4]. Наиболее известными способами активации являются: турбулентная [5, 6], кавитационная [7, 8], механохимическая [12–16], ультразвуковая [17, 18], вибрационная [19] и т. д. Все перечисленные способы направлены на увеличение объемов продуктов гидратации цемента, положительно влияющее на структурообразование цементного камня, что, в свою очередь, приводит к повышению прочности и морозостойкости бетона.

Существенную роль в интенсификации процесса гидратации цемента играет среда, в которой измельчается вяжущее. Авторами [20] отмечается, что в цементном камне мокрого помола образуется более плотная однородная структура по сравнению с сухим помолом. Такая равномерность в структуре увеличивает физико-механические свойства цементного камня и бетона.

Отмечается, что дисперсность вяжущих при обработке в шаровой мельнице в течение 120 мин достигает $650 \text{ м}^2/\text{кг}$, в планетарной мельнице такая же дисперсность получается за 20...25 мин [21]. Увеличение удельной поверхности вяжущего до значения $500...600 \text{ м}^2/\text{кг}$ приводит к увеличению прочностных показателей цементных композиций. Дальнейшее повышение удельной поверхности частиц цемента приводит к потере его активности [22].

В настоящее время активно развиваются различные технологии диспергирования и активации цементных вяжущих композиций в жидкой среде. Однако данные технологии не получили широкого распространения в связи с недостаточно изученными вопросами влияния механохимической активации цементной суспензии на реологию и структурообразование цементных систем.

Повышение количества воды затворения при активации вяжущего приводит к снижению прочности цементных композиций и к повышению пористости [23]. Для устранения этих недостатков необходимо использовать эффективные суперпластификаторы и производить активацию вяжущего в присутствии модифицирующих добавок [24, 25].

Лабораторными экспериментами установлено значительное интенсифицирующее действие поверхностно активных веществ (ПАВ) на помол цемента. Введение некоторых добавок в процессе тонкого измельчения способствует как интенсификации помола, так и улучшению физико-механических свойств получаемых цементных композитов [26, 27].

В настоящее время количество модифицирующих добавок неуклонно растет. Но выбор наиболее эффективного ПАВ для процесса диспергации вяжущего, проводимого в различных аппаратах, представляет собой сложную задачу.

В литературе отсутствуют данные по влиянию механохимической активации (МХА) цементной суспензии на особенности процесса гидратации цемента в зависимости от параметров активации. Недостаточно изучены вопросы по влиянию МХА вяжущего на структуру и морфологию гидратных новообразований. Не изучена роль высокоактивных суперпластификаторов на отмеченные выше свойства.

В связи с вышесказанным целью данной работы является анализ полученных данных по влиянию механохимической активации цементной суспензии на технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства тяжелого бетона, а также на особенности и степень гидратации портландцемента. Используются методы рентгенофазового и дифференциально-термического анализа.

Материалы, оборудование и методы исследования

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5Н Ульяновского завода, отвечающий требованиям ГОСТ 31108-2003. В состав портландцемента входят основные минералы: C_3S – 54 %, C_2S – 20 %, C_3A – 11 %, C_4AF – 12 %, минеральная добавка опока – 9,2 %, примеси SO_3 – 2,8 %.

В качестве мелкого заполнителя использовался песок Камско-Устьинского месторождения с модулем крупности 2,7, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014.

Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С. 3-12.

В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень Уральского месторождения с размером фракций 5...20 мм, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8267-93.

В качестве модифицирующей добавки применялся нафталинформальдегидный суперпластификатор Реламикс Т-2, производимый по ТУ 5870-002-14153664-04, в количестве 1 % от массы цемента.

Технологические свойства бетонной смеси определялись в соответствии с ГОСТ 10181-2014.

Для эксперимента определен тяжелый бетон производственного состава кг/м³ (Цемент:Песок:Щебень=490:555:1315) класса В25.

Водоцементное отношение (В/Ц) исследуемых составов подбиралось из условия достижения одинаковой подвижности марки П2 в соответствии с ГОСТ 10181-2014 (О.К. = 5...9 см).

Механохимическую активацию цементной суспензии проводили в роторно-пульсационном аппарате с частотой вращения рабочего органа 5000 об/мин, выпускаемого по ТУ 5132-001-70447062.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре D2 Phaser (Брукер, Германия) для измерений порошковых препаратов в геометрии Брега – Брентано с использованием монохроматизированного $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda=1,54178 \text{ \AA}$), в режиме шагового сканирования. Режимы измерений и регистрации: напряжение рентгеновской трубки – 30 kV, ток 30 mA. Шаг сканирования – 0.02°. Скорость – 1 град./мин. Диапазон углов сканирования в геометрии Брега – Брентано – 3...60°.

Дифференциально-сканирующая калориметрия проводилась с помощью прибора синхронного термического анализатора STA 443 F3 Jupiter (Netzsch, Германия) с программным обеспечением Netzsch Proteus Thermal Analysis. При выполнении методом дифференциально-сканирующей калориметрии проба образца принималась постоянной и равной 30...50 мг. Скорость подъема температуры составила 10 °С/мин. Диапазон температур от 30 °С до 1000 °С.

pH цементной суспензии определялось с помощью pH-метра testo 206-pH1.

Бетонная смесь приготавливалась следующим образом: предварительно 50 % расчетного количества цемента перемешивали с водой затворения и модифицированной добавкой Реламикс Т-2, затем подвергали механохимической активации в роторно-пульсационном аппарате в течение 2 мин. После чего в полученную суспензию добавляли оставшуюся часть цемента, крупный и мелкий заполнители и перемешивали в бетоносмесителе в течение 5 минут [28]. Из бетонных смесей изготавливали образцы – кубы с размерами 10x10x10 см.

Морозостойкость тяжелого бетона в возрасте 28 суток нормальновлажностного твердения определяли по ГОСТ 10060-2012, гармонизированным в соответствии с EN 12390-9:2006. Показатели поровой структуры тяжелого бетона определяли в соответствии с ГОСТ 12730.4-78.

Сульфатостойкость цементных композиций определяли на образцах-балочках размером 4x4x16 см, изготовленных из цементно-песчаного раствора с соотношением Цемент:Песок = 1:3. Коэффициент сульфатостойкости (Kс) определяли путем сравнения составов, твердеющих в водной среде, с составами, твердеющими в 5 %-м растворе Na_2SO_4 в течение 180 суток, и дальнейшего испытания их на сжатие.

Результаты и обсуждение

Результаты влияния МХА цементной суспензии на свойства бетонной смеси представлены на рисунках 1, 2 и в таблице 1. При этом изучались следующие составы равной подвижности: состав 1 – контрольный (В/Ц = 0.42); 2 – модифицированный добавкой Реламикс Т-2 (В/Ц = 0.31); 3 – состав, в котором вяжущее подвергнуто механоактивации, без добавки (В/Ц = 0.42); 4 – состав, в котором вяжущее подвергнуто МХА, с добавкой Реламикс Т-2 (В/Ц = 0.31).

На рисунке 1 приведены результаты определения сохраняемости свойств подвижности бетонной смеси. Измерения проводились сразу после приготовления бетонной смеси и через 30, 60 и 90 мин. По данным рисунка 1 видно, что для всех составов наблюдается снижение подвижности бетонной смеси с течением времени. Подвижность бетонной смеси через 1.0 час испытаний падает до марки П1 примерно одинаково во всех составах.

Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Vliyaniye mehanohimicheskoy aktivacii na osobennosty processov gidratatsii cementa [Influence of mechanochemical activation on the features in the of hydration of cement]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 3-12. doi: 10.5862/MCE.62.1

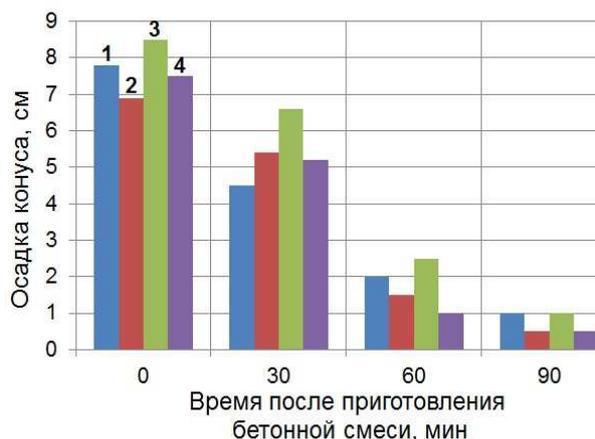


Рисунок 1. Изменение осадки конуса с течением времени: 1–4 – составы бетонной смеси

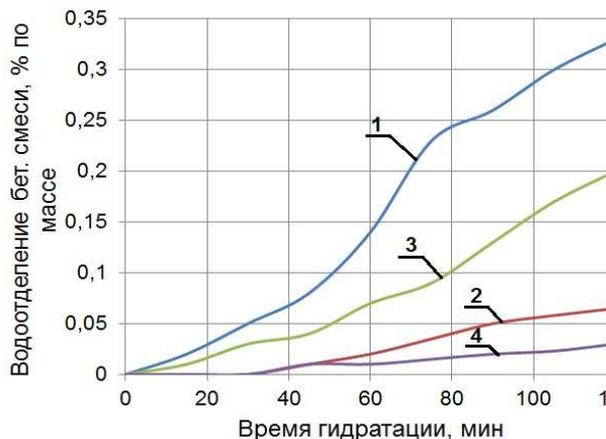


Рисунок 2. Водоотделение бетонной смеси с течением времени

На рисунке 2 представлена зависимость водоотделения бетонной смеси от времени. По данным рисунка 2 видно, что наибольшее количество выделившейся воды заметно в контрольном составе №1 и составляет 0.33 % от массы бетонной смеси. В составе №4, полученном МХА вяжущего, наблюдается наименьшее водоотделение, которое составляет 0.03 % от массы бетонной смеси, что меньше в 11 раз по сравнению с контрольным составом. Следовательно, МХА вяжущего значительно снижает водоотделение в бетонной смеси.

В таблице 1 приведены некоторые свойства бетонной смеси исследуемых составов и кинетика твердения тяжелого бетона.

Таблица 1. Свойства бетонной смеси и кинетика твердения тяжелого бетона

№ состава	Плотность бет. смеси, кг/м ³	Воздухосодержание бет. смеси, %	Температура бет. смеси, °С	Нр	Предел прочности бетона при сжатии, МПа: в возрасте:		
					1 сут.	3 сут.	28 сут.
1	2415	1,26	21,6	11,74	7,8* 100%	22,57* 100%	41,85* 100%
2	2481	0,88	21,8	11,86	13,26 170%	34,76 154%	55,24 132%
3	2444	0,94	22,7	11,65	15,76 202%	30,02 133%	48,13 115%
4	2497	0,64	23,5	11,77	26,29 337%	53,27 236%	65,70 157%

* над чертой приведено среднее значение показателя в МПа; под чертой – относительное от контрольного состава, в %.

Как видно по данным таблицы 1, введение добавки в состав бетонной смеси (состав №2) позволяет увеличить ее плотность на 2.7 %, уменьшить содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси на 43 %, увеличить предел прочности при сжатии тяжелого бетона в суточном возрасте на 70 %, в возрасте 3 суток на 54 % и в марочном возрасте на 32 % по сравнению с контрольным составом.

Механоактивация вяжущего (состав №3) позволяет увеличить плотность бетонной смеси, уменьшить содержание вовлеченного воздуха на 34 %, увеличить предел прочности при сжатии тяжелого бетона в суточном возрасте на 102 %, в возрасте 3 суток на 33 % и в марочном возрасте на 15 % по сравнению с контрольным составом.

МХА вяжущего (состав №4) приводит к увеличению плотности бетонной смеси на 3 %, снижению содержания вовлеченного воздуха на 97 %, значительному повышению предела прочности тяжелого бетона: в суточном возрасте на 237 %, в возрасте 3 суток на 136 % и в марочном возрасте на 57 % по сравнению с контрольным составом.

Увеличение прочности цементных композиций представляет научный интерес для изучения долговечности исследуемых составов. Для оценки влияния МХА на долговечность цементных композиций определена морозостойкость и показатели поровой структуры тяжелого бетона (табл. 2), а также сульфатостойкость цементно-песчаного раствора (ЦПР) (табл. 3). Нумерация составов в таблицах 2 и 3 приведена в соответствии с таблицей 1.

Таблица 2. Морозостойкость и показатели поровой структуры тяжелого бетона

№ состава	Водопоглощение, % за				Показатели поровой структуры						Морозостойкость, F
	15 мин	30 мин	1 час	24 часа	Однородность разм. пор, α	Средний размер пор, λ, (*100)	Полный объем пор, Пп	Объем открытых капиллярных пор, По	Объем условно закрытых капиллярных пор, Пз	Показатель микропористости, Пмк	
1	2.5	3.2	3.5	4.5	0.34	55.4	14.4	12.7	1.7	2.0	200
2	1.9	2.3	3.0	3.6	0.62	34.2	9.4	7.4	2.0	1.6	300
3	1.1	1.8	2.6	3.4	0.66	31.8	8.1	5.8	2.3	1.5	400
4	0.8	1.5	1.9	3.1	0.72	25.5	5.8	3.2	2.6	0.8	600

По данным таблицы 2 видно, что МХА вяжущего приводит к значительному повышению морозостойкости тяжелого бетона (до марки F600), что обуславливается понижением общей пористости на 39 %, снижением капиллярной пористости на 74.8 % и повышением доли закрытых пор на 53 %. При этом морозостойкость состава №3 повышается на 200 циклов по сравнению с контрольным составом.

Таблица 3. Испытание ЦПР на сульфатостойкость

Номер состава	Средняя плотность ЦПР, кг/м ³	В/Ц	Прочность при изгибе, МПа		Прочность при сжатии, МПа		Kс
			В воде	В 5 % растворе СН	В воде	В 5 % растворе СН	
1	2343	0.50	7.03	4.78	52.2	35.5	0.68
2	2365	0.355	8.05	6.92	66.8	57.5	0.86
3	2374	0.50	7.44	6.70	67.2	60.5	0.90
4	2389	0.355	8.73	8.29	71.2	67.6	0.95

Из представленных в таблице 3 данных видно, что МХА вяжущего способствует повышению коэффициента сульфатостойкости цементного раствора на 6...39 % и, следовательно, к повышению стойкости в коррозионно-активных средах.

Для определения характера гидратных новообразований проведены рентгенофазовый анализ (РФА) и дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) исследуемых образцов в возрасте 1 и 28 суток нормальновлажностного твердения. Результаты исследований представлены на рисунках 3-6.

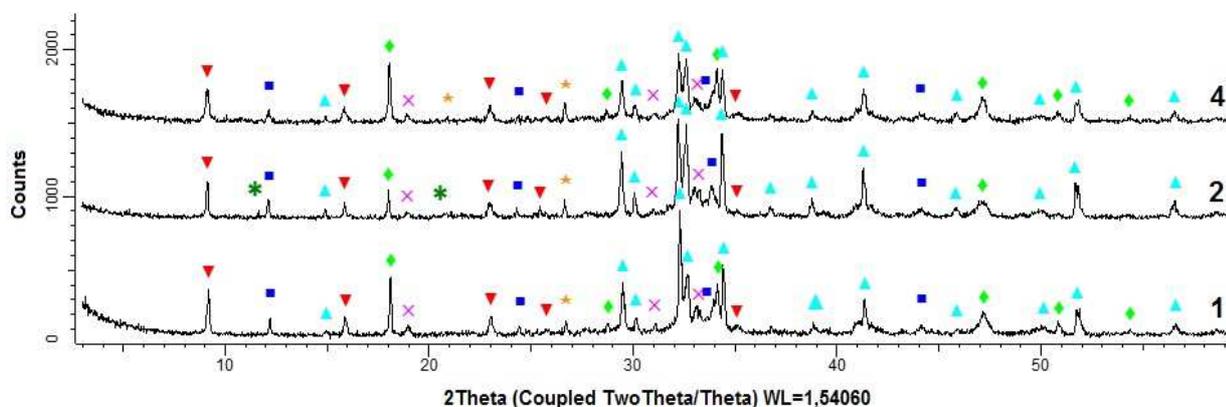
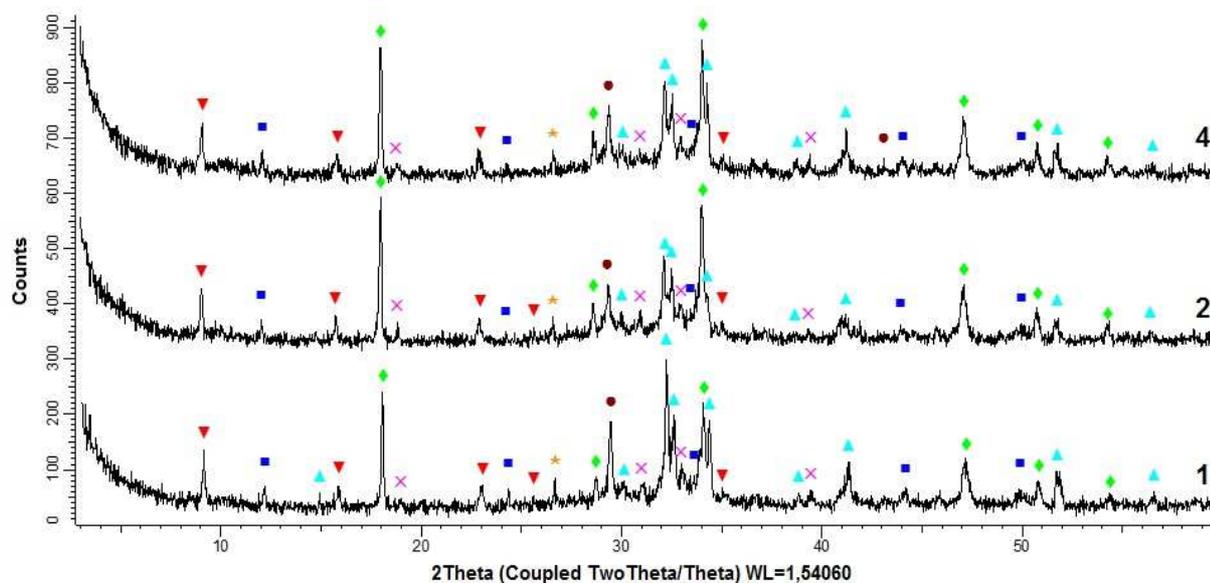


Рисунок 3. Кривые РФА образцов цементного камня в суточном возрасте. Нумерация составов



В соответствии с таблицей 1. Условные обозначения: - SiO_2 ; \blacktriangledown - $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$; \times - Ca_2SiO_4 α - Ca_2SiO_4 ; \blacktriangle - Ca_3SiO_5 ; \blacklozenge - $\text{Ca}(\text{OH})_2$; \blacksquare - $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$; $*$ - $\text{Ca}_2\text{SO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Рисунок 4. Кривые РФА образцов цементного камня в возрасте 28 суток. Нумерация составов в соответствии с таблицей 1

По данным рисунка 3 видно, что наибольшее количество этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) образуется в составе №4, а наименьшее – в составе №1. Известно, что в насыщенном растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ этtringит сначала выделяется в коллоидном тонкодисперсном состоянии, осаждаясь на поверхности частиц $3\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3$, замедляет их гидратацию и продлевает сроки схватывания цемента [29]. Это подтверждают эксперименты по определению сроков схватывания цементного теста: в составе №1 наблюдается замедление сроков схватывания по сравнению с составом №4 [30].

Наименьшее содержание исходных минералов клинкера Ca_2SiO_4 α - Ca_2SiO_4 и Ca_3SiO_5 (алита и белита) и наибольшее количество гидросиликатов кальция (CSH), свидетельствующие о более

полной гидратации цемента, наблюдаются в составе №4, что и подтверждается более высокой прочностью на сжатие исследуемого бетона.

В составе №1 и в составе №2 наблюдается примерно одинаковое количество исходных минералов клинкера, что свидетельствует о том, что гидратация цемента не замедляется в присутствии добавки Реламикс Т-2.

Повышение содержания гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), являющегося продуктом гидролиза клинкерных минералов, в составе твердеющего камня свидетельствует об ускорении гидратации цемента. Наибольшее содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ярко выражено в составе №4. Количественным анализом получено, что содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составе №4 больше на 12 %, чем в составе №1, и в 2.8 раза – чем в составе №2.

На 28-е сутки гидратации исследуемых составов наблюдается увеличение содержания гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), при этом наибольшее количество гидроксида кальция наблюдается в составе №2, а наименьшее – в составе №1.

В составе №2 увеличивается содержание этtringита, что обуславливается содержанием в составе добавки Реламикс-Т2 сульфата натрия, ведущего к образованию двуводного гипса ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) при гидратации с гидроксидом кальция. Также наибольшее уменьшение исходных клинкерных фаз наблюдается в составе №4: содержание Ca_3SiO_5 уменьшается в 1.66 раза, содержание Ca_2SiO_4 α - Ca_2SiO_4 – в 1.47 раза, что свидетельствует о более полной гидратации портландцемента.

На рисунках 5–6 изображены кривые дифференциально-сканирующей калориметрии. Первый эндотермический эффект наблюдается при температуре 100...105 °С и связан с удалением свободной воды, находящейся в порах и капиллярах. Второй эндотермический эффект наблюдается при температуре 450...460 °С и связан с разложением гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), при этом наибольшая величина пика наблюдается в составе №4, полученном МХА вяжущего, что свидетельствует о более высоком содержании ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в составе продуктов гидратации. Это подтверждают данные, полученные при рентгенофазовом анализе. Третий эндотермический эффект связан с разложением карбоната кальция (CaCO_3) и наблюдается при температуре 650...670 °С. В соответствии с полученными данными содержание CaCO_3 после 1-х суток гидратации незначительно и колеблется в пределах 1...3 % от общей массы навески. На 28-е сутки гидратации наибольшее количество CaCO_3 наблюдается в контрольном составе, наименьшее – в составе №4 (на 26% меньше, чем в составе №1). Увеличение содержания CaCO_3 свидетельствует о карбонизации цементного камня, что является негативным явлением для создания композитов повышенной долговечности [31]. По данным ДСК степень гидратации цементного камня состава №1 увеличивается с 12.35 % до 15.9 %; состава №2 – с 8.7 % до 21.9 %; состава №4 – с 16.27 % до 26.9 %. При этом степень гидратации цемента состава №4 во все сроки твердения выше, чем в других составах, что обуславливает более высокие физико-механические характеристики получаемых цементных композитов.

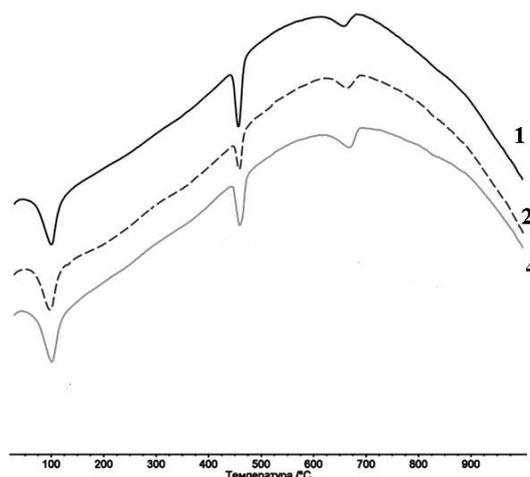


Рисунок 5. Кривые ДСК образцов в первые сутки твердения. Нумерация составов в соответствии с таблицей 1

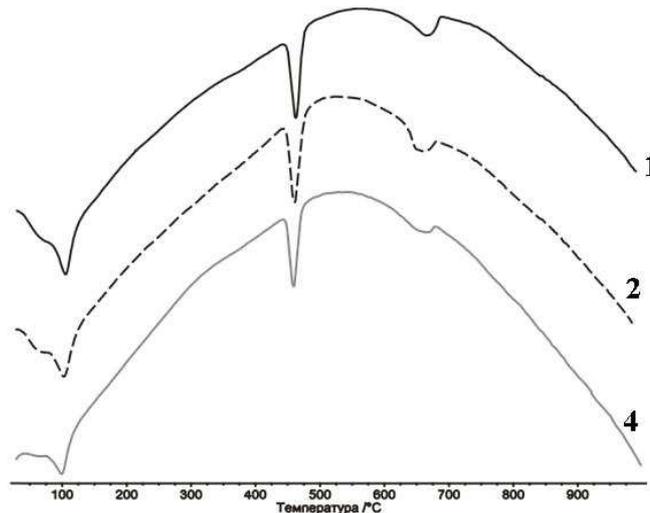


Рисунок 6. Кривые ДСК образцов в возрасте 28 суток. Нумерация составов в соответствии с таблицей 1

Выводы

1. МХА вяжущего значительно влияет на технологические свойства бетонной смеси: уменьшается водоотделение (в 11 раз) и воздухоудерживание бетонной смеси (на 97 %) по сравнению с контрольным составом, увеличивается плотность (на 3 %).

2. МХА вяжущего приводит к резкому росту прочности тяжелого бетона, особенно в первые сутки твердения (на 237 %); морозостойкость тяжелого бетона увеличивается в 3 раза (до марки F600), что обусловлено понижением общей пористости на 39 %, снижением капиллярной пористости на 74.8 % и повышением доли закрытых пор на 53 %. Коэффициент сульфатостойкости ЦПР увеличивается в 1.4 раза, что свидетельствует о повышении долговечности составов, полученных при МХА вяжущего.

3. Высокие темпы твердения цементного камня в первые сутки твердения при МХА вяжущего обуславливаются повышенным содержанием этtringита, наибольшим содержанием гидросиликатов кальция и наименьшим содержанием исходных минералов клинкера. При этом в составе №4 наблюдается наибольшее содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Так, в составе №4 его больше на 12 % по сравнению с составом №1, и в 2.8 раза по сравнению с составом №2.

4. На 28-е сутки твердения наибольшее уменьшение исходных клинкерных фаз портландцемента наблюдается в составе №4: содержание Ca_3SiO_5 уменьшается в 1.66 раза, содержание Ca_2SiO_4 α - Ca_2SiO_4 – в 1.47 раза, что свидетельствует о его более полной гидратации. При этом степень гидратации цемента наибольшая в составе, полученном при МХА вяжущего, и увеличивается с 16.27 % в первые сутки твердения до 26.9 % на 28-е сутки твердения.

5. Получение цементных композиций с высокими физико-механическими показателями при сниженных энерго- и ресурсозатратах является актуальной задачей в строительном производстве, особенно при сокращении времени выдержки бетона в опалубке, сокращении или вовсе отказа от ТВО, уменьшении расхода портландцемента в бетонной смеси при получении равнопрочных бетонов.

Литература

1. Fathollah S. Applied Activation Techniques on Cement-Slag Mortars and Concretes. *Activation techniques*, 2012. 301 p.
2. Совалов И.Г., Хаютин Ю.Г. Методы активации цементов и влияние активации на свойства бетонов. М.: Изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 42 с.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
4. Прокопец В.С. Влияние механоактивационного воздействия на активность вяжущих веществ // Строительные материалы. 2003. №9. С. 28–29.

References

1. Fathollah S. Applied Activation Techniques on Cement-Slag Mortars and Concretes. *Activation techniques*, 2012. 301 p.
2. Sovalov I.G., Khayutin Yu.G. *Metody aktivatsii tsementov i vliyaniye aktivatsii na svoystva betonov* [Methods for the activation and cements activation effect on the properties of concrete]. Moscow: Izd-vo literatury po stroitelstvu, arkhitekture i stroitelnyim materialam. 1963, 42 p. (rus)
3. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Concrete Technology]. M.: izd-vo ASV. 2002. 500 p. (rus)
4. Prokopets V.S. Vliyaniye mekhanoaktivatsionnogo vozdeystviya na aktivnost vyazhushchikh veshchestv

Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С. 3-12.

5. Papadakis M. Recherches sur le malaxage a "baute turbulence" des suspensions de ciment. *Extrait de la Revue des Matériaux de construction*. 1957. No. 498. 37 p.
6. Берией И.И., Косивцев Ю.Г. Влияние турбулентной активации цементных суспензий на изменения в их структуре и прирост прочности цементного камня, раствора и бетона // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по реологии. Рига, 1976. С. 104–105.
7. Найденов Ю.А., Веприяк И.А. Инновационная технология активирования бетонов, основанная на явлении кавитации // Наука XXI век. 2013. №4,
8. Justs J., Shakhmenko G., Mironovs V., Kara P. Cavitation Treatment of Nano and Micro Filler and Its Effect on the Properties of UHPC. *Ultra-High Performance concrete and nanotechnology in construction*. 2012. No. 19,
9. Kriskovaa L., Pontikesa Y., Zhanga F., Özlem Cizerb, Tom Jonesa P., Van Balenc K., Blanpain B. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55, January. Pp. 59–68.
10. Souria A., Kazemi-Kamyabb H., Snellingsb R., Naghizadeha R., Golestani-Farda F., Scrivenerb K. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 77, November. Pp. 47–59.
11. Майснер Ш., Сулименко Л.М. Механохимическая активация процесса синтеза трехкальциевого силиката. М.: 1982. 12 с. Рукопись представлена Моск. хим.-технол. инст.-том. ДЕП в ВИНТИИ 28 янв. 1983 г., № 515. 83 с.
12. Bids V.A., sir E.A., Kutugin V.A. Physical and chemical processes in the activation of cement- sand mixture in a centrifugal mixer // Proceedings of the universities . Physics. 2011. №11/3. Pp. 346–349.
13. Sobolev K. Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag. *Cement & Concrete Composites*. 2005. 27. Pp. 848–853.
14. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона // Инженерно-строительный журнал. 2015. №2. С. 63–69.
15. Kumar S. [et al.] Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cement & Concrete Composites*. 2008. 30(8). Pp. 679–685.
16. Sekulic Z [et al.] Mechanical activation of cement with addition of fly ash. *Mater Lett*. 1999. 39(2). Pp. 115–121.
17. Sayer S.M., Dahlin A. Propagation of ultrasound through hydrating cement parts at early times // Advance cement based materials. 1993. №1. Pp. 12–21.
18. Kennedy D.P. *A study to determine and quantify the benefits of using power ultrasound technology in a precast concrete manufacturing environment*. Trinity College Dublin, 2012.
19. Ахвердов И.П., Шалимо М.А. Влияние вибрации и ультразвуковых колебаний на формирование структуры цементного камня // Бетон и железобетон. 1960. №9. С. 403–405.
20. Рыбакова М.В., Барбанягрэ В.Д. Особенности процессов твердения цементного камня при совмещении процессов помола и гидратации // Сб. докладов 3-го Международного совещания по химии и технологии цемента. Москва, 2009. С. 182–184.
- [Influence of mechanical activation effect on the activity of binders]. *Building materials*. 2003. No. 9. Pp. 28–29. (rus)
5. Papadakis M. Recherches sur le malaxage a "baute turbulence" des suspensions de ciment. *Extrait de la Revue des Matériaux de construction*. 1957. No. 498. 37 p.
6. Beriyey I.I., Kosivtsev Yu.G. Vliyaniye turbulentnoy aktivatsii tsementnykh suspenziy na izmeneniya v ikh strukture i prirost prochnosti tsementnogo kamnya, rastvora i betona [Influence of turbulent activation of cement slurries to changes in their structure and increase in strength of cement paste, mortar and concrete]. *Rheology of concrete mixes and its technological challenges: Tez Dokl II All-Union Symposium on rheology*. Riga, 1976. Pp.104-105. (rus)
7. Naydenov Yu.A., Vepriyayk I.A. Innovatsionnaya tekhnologiya aktivirovaniya betonov, osnovannaya na yavlenii kavitatsii [Innovative activation of concrete, based on the phenomenon of cavitation]. *Science XXI century*, 2013. No. 4. (rus)
8. J. Justs, G. Shakhmenko, V. Mironovs, P. Kara. Cavitation Treatment of Nano and Micro Filler and Its Effect on the Properties of UHPC. *Ultra-High Performance concrete and nanotechnology in construction*. 2012. No 19.
9. Kriskovaa L., Pontikesa Y., Zhanga F., Özlem Cizerb, Tom Jonesa P., Van Balenc K., Blanpain B. Influence of mechanical and chemical activation on the hydraulic properties of gamma dicalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 55, January. Pp. 59–68.
10. Souria A., Kazemi-Kamyabb H., Snellingsb R., Naghizadeha R., Golestani-Farda F., Scrivenerb K. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 77, November. Pp. 47–59.
11. Maysner Sh., Sulimenko L.M. Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya protsesssa sinteza trekhkaltsiyevogo silikata [Mechanochemical activation of the synthesis process of tricalcium silicate]. - М.: 1982. 12 p. Manuscript submitted Mosk. Chem-primary process. inst-how. DEP VINITI January 28. 1983, № 515, 83 p. (rus)
12. Bids V.A., sir E.A., Kutugin V.A. Physical and chemical processes in the activation of cement- sand mixture in a centrifugal mixer // Proceedings of the universities . Physics . - 2011 - 54 T - №. 11/3 - Pp. 346-349.
13. Sobolev K. Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag. *Cement & Concrete Composites*. 2005. 27. Pp. 848–853.
14. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Vliyaniye mekhanokhimicheskoy aktivatsii v'yazhushchego na svoystva melkozernistogo betona [Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 2. Pp. 63-69. (rus)
15. Kumar S. [et al.] Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cement & Concrete Composites*. 2008. 30(8). Pp. 679–685.
16. Sekulic Z [et al.] Mechanical activation of cement with addition of fly ash. *Mater Lett*. 1999. 39(2). Pp. 115–121.
17. Sayer S.M., Dahlin A. Propagation of ultrasound through hydrating cement parts at early times. *Advance cement based materials*, №1, 1993, pp.12-21.
18. Kennedy D.P. *A study to determine and quantify the benefits of using power ultrasound technology in a precast concrete manufacturing environment*. Trinity College Dublin, 2012.
19. Akhverdov I.P., Shalimo M.A. Vliyaniye vibratsii i ultrazvukovykh kolebaniy na formirovaniye struktury

Ibragimov R.A., Pimenov S.I. Vliyanie mekhanokhimicheskoy aktivatsii na osobennosty processov gidratatsii cementa [Influence of mechanochemical activation on the features in the of hydration of cement]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2. Pp. 3-12. doi: 10.5862/MCE.62.1

21. Плотников В.В. Повышение эффективности механохимической активации цементных композиций в жидкой среде: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 427 с.
22. Weibel M., Mishra R.K. Comprehensive understanding of grinding aids. *ZKG*. 2014. No. 6. Pp. 28–39.
23. Masoero E., Thomas J.J., Jennings H.M. A reaction zone hypothesis for the effects of particle size and water-to-cement ratio on the early hydration kinetics of C3S. *J. Am. Ceram. Soc.* 2014. 97. Pp. 967–975.
24. Juhasz A.Z., Opoczky L. *Mechanical activation of minerals by grinding pulverizing and morphology of particles*. Akadémiai Kiadó; 1990. 234 p.
25. Katsioti M. [et al.] Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance. *Constr Build Mater.* 2009. 23(5). Pp. 1954–1959.
26. Плотников В.В., Кривобородов Ю.Р. Активация цемента путем гидроволнового диспергирования // Цемент. 1989. №1. С. 20–21.
27. Lu D., Wei S. Effect of grinding aids on producing ultrafine particles. *Adv Powder Technol.* 1992. 3(1). Pp. 47–53.
28. Пат. №2559236 Российская Федерация, С1 С04В 40/00 С04В 28/04 С04В 24/00. Способ приготовления бетонной смеси / Изотов В.С., Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Галиуллин Р.Р. Опубл. 10.08.2015. Бюл. №22. 5 с.
29. Taylor H.F.W. *Cement Chemistry*. Academic Press. London (u.a.). 1964.
30. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние суперпластифицирующей добавки на процессы гидратации цемента и кинетику твердения тяжелого бетона при механохимической активации вяжущего // Сборник докладов V Международного семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. Санкт-Петербург: АлитИнформ, 2015. С. 119–127.
31. Tasong W.A., Cripps J.C., Lynsdale C.J. Aggregate-cement chemical interactions. *Cement and Concrete Research*. 1998. T. 28. No. 7. Pp. 1037–1048.
20. M.V. Rybakova, V.D. Barbanyagre. Osobennosti protsessov tverdeniya tsementnogo kamnya pri sovmeshchenii protsessov pomola i gidratatsii [Features of processes of hardening cement paste at overlapping processes of grinding and hydration]. *Coll. Reports of the 3rd International Meeting on the chemistry and technology of cement*. Moscow, 2009, Pp. 182 – 184. (rus)
21. Plotnikov V.V. *Povysheniye effektivnosti mekhanokhimicheskoy aktivatsii tsementnykh kompozitsiy v zhidkoy srede* [Improving the efficiency of mechanical activation of cement compositions in a liquid medium]. Doctoral theses. Moscow, 2000, 427 p. (rus)
22. Weibel M., Mishra R.K. Comprehensive understanding of grinding aids. *ZKG*. 2014. No. 6. Pp. 28–39.
23. Masoero E., Thomas J.J., Jennings H.M. A reaction zone hypothesis for the effects of particle size and water-to-cement ratio on the early hydration kinetics of C3S. *J. Am. Ceram. Soc.* 2014. 97. Pp. 967–975.
24. Juhasz A.Z., Opoczky L. *Mechanical activation of minerals by grinding pulverizing and morphology of particles*. Akadémiai Kiadó; 1990. 234 p.
25. Katsioti M. [et al.] Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance. *Constr Build Mater.* 2009. 23(5). Pp. 1954–1959.
26. Plotnikov V.V., Krivoborodov Y.R. Aktivaciya cementa putem gidrovolnovogo dispergirovaniya [Activation by gidrowave cement dispersion]. *Cement*, 1989. No. 1. Pp. 20-21. (rus)
27. Lu D., Wei S. Effect of grinding aids on producing ultrafine particles. *Adv Powder Technol.* 1992. 3(1). Pp. 47–53.
28. Izotov V.S., Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Galiullin R.R. *Patent №2559236 Russia, S1 S04V 40/00 S04V 28/04 S04V 24/00. Sposob prigotovleniya betonnoy smesi* [method of preparing a concrete mix] (rus)
29. Taylor H.F.W. *Cement Chemistry*. Academic Press. London (u.a.). 1964.
30. Pimenov S.I., Ibragimov R.A. Vliyaniye superplastifitsiruyushchey dobavki na protsessy gidratatsii tsementa i kinetiku tverdeniya tyazhelogo betona pri mekhanokhimicheskoy aktivatsii vyazhushchego [Influence super plasticizer to cement hydration process and hardening kinetics of heavy concrete in the mechanical activation binder]. *Proceedings of the V International Workshop contest for young scientists and graduate students working in the field of binders, concrete and dry mixes*. St. Petersburg: "AlitInform", 2015. Pp.119-127. (rus)
31. Tasong W.A., Cripps J.C., Lynsdale C.J. Aggregate-cement chemical interactions. *Cement and Concrete Research*. 1998. T. 28. No. 7. Pp. 1037–1048.

Руслан Абдирашитович Ибрагимов,
+7(843)510-47-31; эл. почта:
rusmag007@yandex.ru
Сергей Иванович Пименов,
+7(937)0056711; эл. почта: 3.14manon@mail.ru

Ruslan Ibragimov,
+7(843)510-47-31; rusmag007@yandex.ru

Sergey Pimenov,
+7(937)0056711; 3.14manon@mail.ru

© Ибрагимов Р. А., Пименов С. И., 2016