

doi: 10.5862/MCE.54.7

Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона

*К.т.н., доцент Р.А. Ибрагимов;
ассистент С.И. Пименов;*

д.т.н., заведующий кафедрой В.С. Изотов,

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация. В данной статье представлены результаты влияния механохимической активации цементной суспензии на физико-механические свойства мелкозернистого бетона. Определено оптимальное время механохимической активации цементной суспензии, при котором достигается максимальное повышение прочности на сжатие мелкозернистого бетона.

Экспериментально установлено количество активированного портландцемента от его общей массы в составе мелкозернистого бетона. Изучено влияние суперпластифицирующей добавки Реламикс Т-2 на свойства мелкозернистого бетона, полученного на активированном вяжущем, на тепловыделение цементного теста. Показано изменение гранулометрического состава портландцемента, подвергнутого механохимической активации.

Результаты экспериментальных исследований показали, что, применяя механохимическую активацию вяжущего, можно значительно повысить прочность бетона в ранние сроки твердения при изгибе (на 71 %), при сжатии (на 64 %), а также сохранить ее в проектном возрасте, что особенно актуально для монолитного строительства. Значительно изменяется дисперсный состав активированного вяжущего, что обуславливает высокие физико-механические показатели исследуемых бетонов и скорость их твердения.

Ключевые слова: механохимическая активация; роторно-пульсационный аппарат; суперпластификатор; цементная суспензия; мелкозернистый бетон

Физико-механические характеристики цементных композитов зависят от того, как используются свойства вяжущего [1–4]. Добиться наиболее полного их использования можно, активируя вяжущее различными способами [5, 6]. За счет тонкого измельчения цементного порошка ускоряется процесс гидратации, повышается активность вяжущего и, соответственно, прочность бетона [7–11]. Авторы работ [12, 13] отмечают, что у цементов тонкого помола с удельной поверхностью более 500 м²/кг прочностные характеристики мало отличаются на разных сроках твердения (на вторые сутки твердения прочность на сжатие увеличивается на 5–10 %, на 28-е сутки прочность одинакова, несмотря на увеличение удельной поверхности). Принимая во внимание экономическую и технологическую целесообразность, принято считать оптимальной удельную поверхность в пределах 400–500 м²/кг.

В настоящее время активно развиваются различные технологии диспергирования и активации цементных вяжущих композиций в жидкой среде. С возникновением роторно-пульсационных аппаратов (РПА) появилась возможность активировать цементно-водную суспензию непосредственно в РПА [14]. Но технология, предусматривающая активацию цементно-водной суспензии, не получила широкого распространения в связи с недостаточно изученными вопросами влияния механоактивации на реологию и структурообразование цементных систем.

Авторами [15–17] отмечается, что механоактивация цементной суспензии в начальный период гидратации и структурообразования способствует увеличению объема химически активной коагуляционной среды и ее уплотнению, что приводит к увеличению прочности до 30 %. В статье [18] отмечается, что при активации цементной суспензии в РПА суточная прочность цементного раствора увеличивается на 70 %. Также отмечается [19], что активацию вяжущего рационально производить в процессе приготовления бетонной смеси, так как при традиционном процессе зёрна цемента размером 40–60 мкм и более остаются негидратированными.

Процесс диспергации вяжущего в водной среде можно интенсифицировать за счет дополнительного введения ПАВ. Такой процесс диспергации можно назвать механохимической активацией (МХА).

В настоящее время отсутствуют данные о влиянии параметров МХА на прочность цементных композитов, в том числе неизвестно, какую долю цемента следует активировать. Неоднозначны данные по влиянию МХА цементной суспензии на кинетику тепловыделения цементного теста, на гранулометрический состав цементного порошка после активации. Не изучена роль высокоактивных суперпластификаторов на отмеченные выше свойства.

Нами проведены исследования по определению основных параметров механохимической активации цементных суспензий для получения мелкозернистых бетонов в РПА 0.8-55А-2.2УЗ, производимого по ТУ 5132-001-70447062.

Эксперимент проводился следующим образом: расчетное количество цемента предварительно перемешивалось с расчетным количеством воды затворения и затем загружалось в бункер РПА для активации.

Для определения оптимального времени механохимической активации (МХА) цементной суспензии эксперимент проводили на мелкозернистом бетоне состава 1:3 с использованием портландцемента ЦЕМ III/A 32,5Н Ульяновского завода, отвечающего требованиям ГОСТ 31108-2003 и обогащенного песка Камского месторождения с модулем крупности 2.7 в присутствии нафталинформальдегидного суперпластификатора Реламикс Т-2. Определение оптимальной дозировки добавки Реламикс Т-2 производилось по изменению нормальной густоты цементного теста. Выявлено, что наибольшее снижение нормальной густоты цементного теста при введении добавки от 0,6 и до 1,2 % от массы цемента наблюдается при дозировке 1 % и составляет 0,205, что на 24 % ниже нормальной густоты цементного теста без добавки. Дальнейшее увеличение дозировки суперпластификатора не приводит к снижению нормальной густоты. Поэтому для дальнейших исследований в качестве оптимальной принята дозировка добавки 1 % от массы цемента.

Расход цемента во всех составах бетона принят постоянным и составил 500 кг/м³, а заполнителя – 1500 кг/м³. Водоцементное отношение (В/Ц) во всех составах 0,355. В качестве контрольного образца принят состав с исследуемой добавкой, но без механохимической активации. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние времени механохимической активации на физико-механические свойства мелкозернистого бетона

Продолжительность МХА, мин	Средняя плотность мелкозернистого бетона, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:		Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:	
		1 сут.	28 сут.	1 сут.	28 сут.
-	2328	<u>1,42*</u> 100%	<u>5,86*</u> 100%	<u>6,12*</u> 100%	<u>40,04*</u> 100%
1	2347	<u>2,35</u> 165%	<u>6,25</u> 107%	<u>9,76</u> 159%	<u>41,76</u> 104%
2	2358	<u>2,96</u> 208%	<u>6,48</u> 111%	<u>11,88</u> 194%	<u>43,76</u> 109%
3	2364	<u>3,15</u> 222%	<u>6,52</u> 112%	<u>12,42</u> 203%	<u>44,82</u> 112%
3,5	2368	<u>3,22</u> 227%	<u>6,5</u> 111%	<u>13,02</u> 212%	<u>45,62</u> 114%
4	2370	<u>3,1</u> 218%	<u>6,37</u> 109%	<u>12,76</u> 208%	<u>44,87</u> 112%

Примечание: над чертой приведено среднее значение показателя, под чертой – относительное значение показателя в % от контрольного.

По данным таблицы 1 видно, что с увеличением продолжительности МХА цементной суспензии повышается плотность мелкозернистого бетона, повышается его прочность. При активации цементной суспензии от 1 до 4 минут предел прочности при изгибе мелкозернистого бетона повышается на 65–127 % в первые сутки твердения, на 7–12 % в возрасте 28 суток; предел прочности при сжатии повышается на 59–112 % в первые сутки твердения и на 4–14 % в проектном возрасте. Оптимальное время МХА как с точки зрения повышения физико-механических показателей мелкозернистого бетона, так и с точки зрения снижения износа рабочих органов РПА составляет 2 минуты.

С целью снижения уровня износа рабочих органов РПА проведен специальный эксперимент, в котором активации подвергалась цементная суспензия, где расход воды принят постоянным, а доля цемента изменялась от 25 до 100 % от расчетного количества (500 кг/м^3). Время активации во всех опытах составило 2 минуты.

Контрольные образцы – балочки размерами $4 \times 4 \times 16$ см, так же как и в первом случае, изготавливались из состава 1:3 по ГОСТ 310.4 и испытывались в возрасте 1, 3 и 28 суток нормально-влажностного твердения. Расход цемента во всех составах был постоянным (500 кг/м^3). Водоцементное отношение также не менялось и составило 0,355.

Результаты испытания образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние доли активированного портландцемента на физико-механические свойства мелкозернистого бетона

Доля активированного цемента, кг/м^3 (%)	В/Ц суспензии	Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте:			Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте:		
		1 сут.	3 сут.	28 сут.	1 сут.	3 сут.	28 сут.
-	-	<u>1,47*</u> 100%	<u>4,2*</u> 100%	<u>5,93*</u> 100%	<u>6,04*</u> 100%	<u>19,67*</u> 100%	<u>40,32*</u> 100%
125 (25)	1,42	<u>1,88</u> 128%	<u>4,56</u> 109%	<u>6,05</u> 102%	<u>8,21</u> 136%	<u>21,82</u> 111%	<u>42,15</u> 104%
250 (50)	0,71	<u>2,52</u> 171%	<u>4,81</u> 120%	<u>6,17</u> 104%	<u>9,91</u> 164%	<u>23,44</u> 119%	<u>43,47</u> 108%
375 (75)	0,473	<u>2,74</u> 186%	<u>5,13</u> 122%	<u>6,23</u> 105%	<u>10,2</u> 169%	<u>24,21</u> 123%	<u>43,94</u> 109%
500 (100)	0,355	<u>2,92</u> 198%	<u>5,24</u> 124%	<u>6,25</u> 105%	<u>11,02</u> 182%	<u>24,57</u> 125%	<u>44,33</u> 110%

Примечание: над чертой приведено среднее значение показателя, под чертой – относительное значение показателя в % от контрольного

Анализ результатов испытаний образцов, приведенных в таблице 2, показывает, что с повышением доли активированного цемента происходит повышение предела прочности мелкозернистого бетона как при изгибе, так и при сжатии. Особенно существенное повышение прочности бетона достигается в ранние сроки твердения. Так, в возрасте 1 суток предел прочности при изгибе в зависимости от доли активированного вяжущего повышается на 28–98 %, в возрасте 3 суток прирост прочности меньше и составляет от 9 до 24 %.

Аналогичная зависимость наблюдается и при определении предела прочности при сжатии.

В проектном возрасте прирост прочности замедляется и составляет от 2 до 10 % и мало зависит от доли активированного цемента.

Поэтому для дальнейших исследований активации подвергались 50 % расчетного количества цемента. В этом случае прирост прочности мелкозернистого бетона в суточном возрасте составляет при изгибе 71 %, а при сжатии 64 %.

Оценка влияния МХА на процесс гидратации цемента производилась методом термосной калориметрии. Исследованию подвергались составы, содержащие только суперпластификатор, с использованием и без использования МХА. Результаты сравнивались с контрольным составом без добавки и без активации.

Результаты эксперимента приведены на рисунке 1.

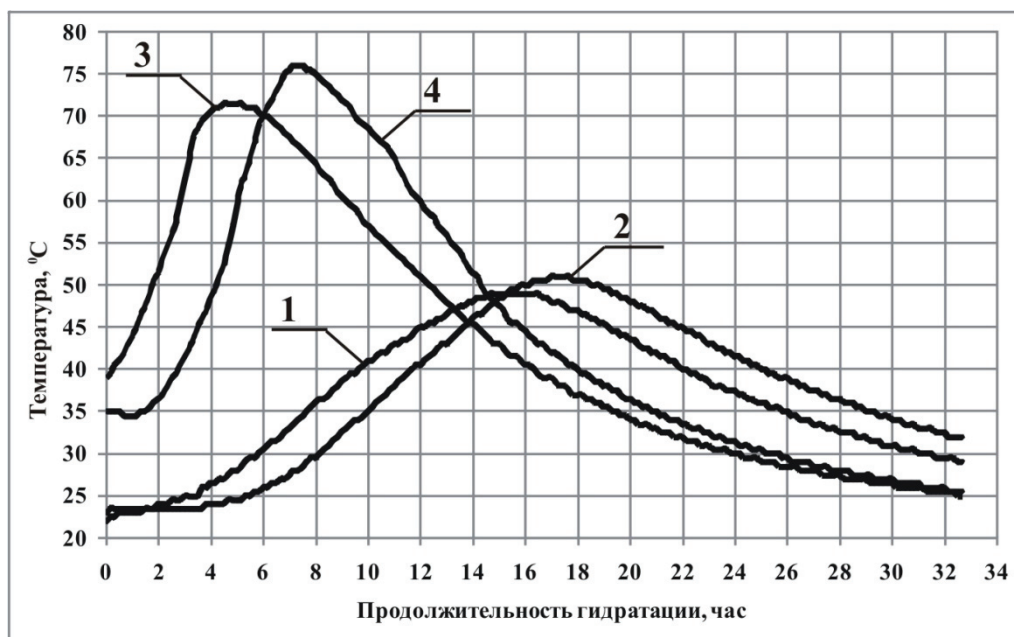


Рисунок 1. Кинетика тепловыделения цементного теста: 1 – контрольный состав; 2 – состав, модифицированный добавкой Реламикс Т-2; 3 – состав без добавок после механоактивации; 4 – состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА

Из рисунка 1 видно, что механоактивация вяжущего в отсутствие добавки суперпластификатора приводит к повышению скорости гидратации цемента, о чем свидетельствует повышение температуры гидратации от 49 °С (контрольный состав) до 72 °С при одновременном сдвиге температурного максимума на 11 часов в сторону начала процесса.

Обычное введение в цементное тесто добавки суперпластификатора без механоактивации вяжущего приводит к незначительному замедлению процесса гидратации вяжущего.

В случае, когда вяжущее активируется в присутствии добавки Реламикс Т-2, обеспечивается самое высокое значение температуры гидратации цемента, а также и существенное ускорение этого процесса.

Ускорение процесса гидратации цемента, вероятно, связано с диспергацией частиц вяжущего при МХА. Для оценки степени диспергации цемента при МХА определен дисперсный состав проб цементного порошка на лазерном анализаторе крупности частиц «Horiba La-950V2», полученного после гидратации портландцемента с использованием и без использования МХА цементного теста. Обезвоживание активного в водной среде цемента и клинкерных минералов производилось на воронке Бюхнера, соединенной с водоструйным насосом. Сразу же после отделения жидкой фазы проба на фильтре заливалась чистым спиртом, а затем подвергалась консервации в ацетоне, при этом количество ацетона бралось не менее пятикратного объема отобранной пробы. Далее материал высушивался в сушильном шкафу при температуре + 105 °С. Измерение удельной поверхности предварительно обезвоженного и высушенного цемента по вышеуказанной методике проводилось методом воздухопроницаемости (прибор ПСХ-9).

Дисперсный состав проб цементного камня: 1 – исходный портландцемент; 2 – состав без добавок и без механоактивации; 3 – состав без добавок после механоактивации; 4 – состав с добавкой Реламикс Т-2 и без МХА; 5 – состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Из приведенных в таблице 3 данных видно, что удельная поверхность цементного порошка, подвергнутого механоактивации (состав №3) повышается на 10 % по сравнению с составом без механоактивации (состав №2). При введении добавки Реламикс Т-2 в цементную суспензию, подвергнутую МХА, удельная поверхность цементного порошка (состав №5) повышается на 29 % по сравнению с составом, модифицированным добавкой Реламикс Т-2 без активации (состав №4).

Средний размер частиц исходного портландцемента (состав №1) крупнее частиц цементного порошка, подвергнутого механоактивации (состав №3), в 1,26 раза и крупнее частиц, подвергнутых МХА в присутствии добавки (состав №5), в 2,8 раза.

Таблица 3. Удельная поверхность и гранулометрический состав исследуемых составов

№ п/п	Средний размер, мкм	Удельная поверхность, м ² /кг	Выход фракций, %:				
			размером, мкм:				
			≤20	20-40	40-60	60-80	>80
1	48,47	298,33	40,27	18,43	13,95	7,21	20,14
2	45,87	324,66	40,79	18,31	14,06	7,6	19,24
3	38,35	356,35	54,01	21,12	10,41	8,74	5,72
4	42,25	331,62	42,28	19,28	12,86	7,76	17,82
5	17,10	427,84	73,68	24,45	1,87	-	-

При механоактивации цемента выход фракций менее 20 мкм увеличивается в 1,34 раза по сравнению с исходным портландцементом. При МХА вяжущего выход фракций менее 20 мкм увеличивается в 1,82 раза по сравнению с исходным портландцементом. При определении дисперсного состава цементного порошка с использованием МХА частицы крупнее 60 мкм не обнаружены.

Изучена структура цементного камня с помощью электронного микроскопа, оснащенного спектрометром энергетической дисперсии AZtec X-MAX. Разрешение спектрометра 127 эВ. Съемка морфологии поверхности проводилась при ускоряющем напряжении 5 кэВ. Элементный анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кэВ и рабочем отрезке 9 мм, глубина зондирования составила менее 1 микрона.

Проводился скол цементного камня, который напылялся сплавом Au/Pd в соотношении 80/20 на высоковакуумной установке Quorum T150 ES. Электронно-микроскопические снимки представлены на рисунке 2.

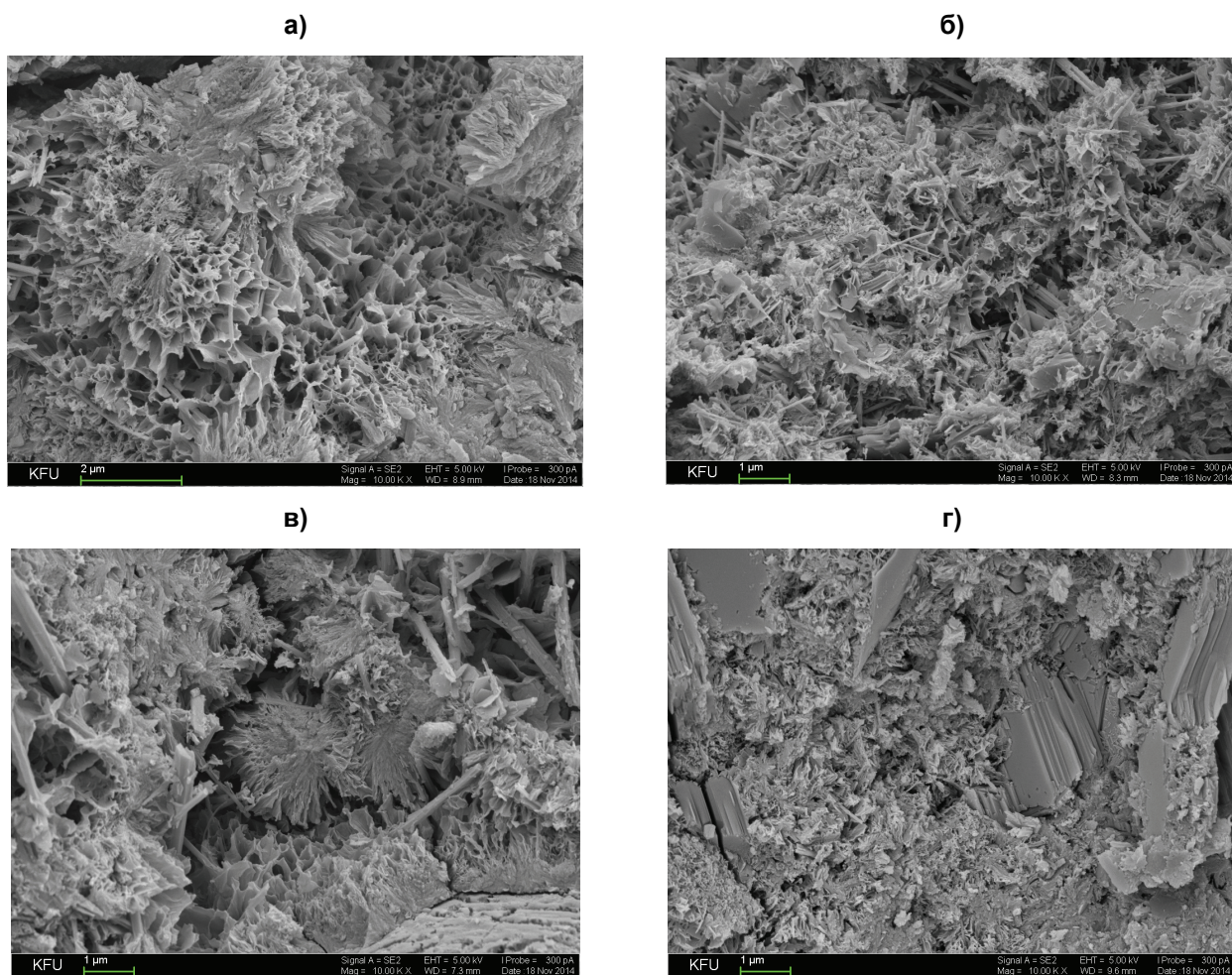


Рисунок 2. Электронно-микроскопические снимки исследуемых образцов, увеличение 10000X

Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона

Снимки исследуемых образцов: а) состав без добавок и без механоактивации; б) состав без добавок после механоактивации; в) состав с добавкой Реламикс Т-2 и без МХА; г) состав с добавкой Реламикс Т-2 после МХА.

Как видно из рисунка 2, МХА вяжущего (состав г) приводит к формированию плотной и мелкокристаллической структуры гидратных новообразований, что является одной из причин повышения прочности мелкозернистого бетона, особенно в ранние сроки твердения [20, 21].

Выводы

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено положительное влияние МХА вяжущего на физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

Установлена оптимальная доля цемента для МХА вяжущего (50 %), при которой обеспечивается повышение предела прочности на 64 % при сжатии и на 71 % при изгибе в суточном возрасте по сравнению с составом с добавкой, но без механоактивации. Повышение прочности бетона при МХА вяжущего обусловлено повышением степени и скорости гидратации цемента, уменьшением среднего размера частиц в 2,8 раза, увеличением количества частиц менее 20 мкм на 82 % и полным отсутствием зерен от 60 мкм и более.

В проектном возрасте прочность мелкозернистого бетона практически не отличается от контрольного состава, но необходимость в механоактивации вяжущего возникает при решении вопросов сокращения сроков распалубки или снижении энергозатрат на тепловлажностную обработку железобетонных изделий. Повышение предела прочности при сжатии на 59–112 % в ранние сроки твердения, как это следует из таблицы 1, может оказаться решающим при выборе технологических параметров изготовления железобетонных конструкций и изделий.

Работа выполнена в рамках Государственного договора №10–50 т/Г 2014, финансируемого Академией наук республики Татарстан, поддержана стипендией президента РФ для молодых ученых для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (2015–2017 гг.).

Литература

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
2. Poole J.L., Riding K.A., Juenger M.C.G., Folliard K.J., Schindler A.K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy // Journal of ASTM International. 2010. Vol. 7. No.9.
3. Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Кожабеков Т.А., Марченко С.М. Физико-механические, силовые, энергетические и структуроформирующие параметры бетона // Бетон и железобетон. 2002. №2. С. 10–12.
4. Bezzubtseva M.M., Ruzhev V.A., Yuldashev R.Z. Electromagnetik mechanoactivation of dry construction mixes // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2013. No 2. Pp. 241–245.
5. Морозов Н.М., Степанов С.В., Хозин В.Г. Ускоритель твердения бетона на основе гальванического шлама // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8(34). С. 67–71.
6. Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Di Canio F. Mechanochemical activation of coal fly ash for production of high strength cement conglomerates // Химия в интересах устойчивого развития. 2009. Т. 17. №6. С. 567–571.
7. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. №11/3. С. 346–349.
8. Плотников В.В., Кривобородов Ю.Р. Эффективность домола цемента в устройстве для диспергирования смесей // Цемент. 1988. №12. С. 16–17.
9. Нагорняк И.Н. Влияние гидромеханической активации цементных вяжущих на долговечность бетонов. Автореф. дис.канд. техн. наук. Саранск, 2006. С. 19.

10. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T.C., Ravi Kumar B., Das S.K., Mehrotra S.P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30. No. 8. Pp. 679–685.
11. Сулименко Л.М., Шалуненко Н.И., Урханова Л.А. Механохимическая активация вяжущих композиций // Известия вузов. Строительство. 1995. №11. С. 63–67.
12. Sajedi F., Abdul Razak H. Thermal activation of ordinary portland cement-slag mortars // Materials and Design. 2010. Vol. 31. No. 9. Pp. 4522–4527.
13. Qian J., Shi C., Wang Z. Activation of blended cements containing fly ash // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31. No. 8. Pp. 1121–1127.
14. Родионов Р.Б. Инновационные разработки роторно-пульсационной техники для производства строительных материалов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2006. №4. С. 24–25.
15. Андреева А.В., Давыдова Н.Н., Буренина О.Н., Петухова Е.С. Улучшение качества мелкозернистого бетона путем механоактивации цемента // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 94. С. 451–460.
16. Машкин Н.А., Гутарева Н.А., Зибницкая Н.Е., Урусова Т.А., Шарыпов П.Ю. Влияние активирования цементно-песчаных суспензий на физико-механические свойства мелкозернистых бетонов // Известия вузов. Строительство. 2012. №11–12. С. 26–33.
17. Kumar S., Bandopadhyay A., Rajinikanth V., Alex T.C., Kumar R. Improved processing of blended slag cement through mechanical activation // Journal of Materials Science. 2004. Vol. 39. No.10. Pp. 3449–3452.
18. Овчаренко Г.И., Хижинкова Е.Ю., Горн К.С. Влияние активации цементно-зольных композиций на прочность камня // Известия вузов. Строительство. 2010. №6. С. 9–13.
19. Прокопец В.С. Влияние механоактивационного воздействия на активность вяжущих веществ // Строительные материалы. 2003. №9. С. 28–29.
20. Sajedi F. Effect of curing regime and temperature on the compressive strength of cement-slag mortars // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 549–556.
21. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. 2014. №8. С. 590–595.

*Руслан Абдирашитович Ибрагимов, г. Казань, Россия
Тел. моб.: +7(929)7223248; эл. почта: rsmag007@yandex.ru*

*Сергей Иванович Пименов, г. Казань, Россия
Тел. моб.: +7(937)0056711; эл. почта: 3.14tanon@mail.ru*

*Владимир Сергеевич Изотов, г. Казань, Россия
Тел. раб.: +7(843)5104731; эл. почта: v_s_izotov@mail.ru*

© Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.7

Effect of mechanochemical activation of binder on properties of fine-grained concrete

R.A. Ibragimov*Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
+79297223248; e-mail: rusmag007@yandex.ru***S.I. Pimenov***Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
+79370056711; e-mail: 3.14manon@mail.ru***V.S. Izotov***Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
+78435104731; v_s_izotov@mail.ru*

Key words

mechanochemical activation; rotor-pulsation apparatus; superplasticizer; cement slurry; cement composites

Abstract

This paper presents the effect of mechanochemical activation of on the physico-mechanical properties of fine-grained concrete. The optimal time of mechanical activation of cement slurry was defined, at which the maximum increase in the compressive strength of fine-grained concrete was achieved.

The quantity of Portland cement activated by its total weight in the composition slurries was experimentally established. The effect of superplasticizer Relamiks T-2 on the properties of fine-grained concrete produced on activated binder for heat cement paste both with and without supplement, was studied. The change of particle size distribution of Portland cement subjected to mechanical activation was shown.

The results of experimental studies have shown that mechanochemical activated binder can significantly increase in the early stages of hardening the bending strength (71 %) and compression strength (64 %), and maintain it in project life, which is especially important for monolithic construction. The composition of the particulate activated binder changes significantly, which leads to high physical and mechanical properties of the investigated concrete and its hardening rate.

References

1. Bazhenov Y.M. *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow: Izd-vo DIA. 2002. 500 p. (rus)
2. Poole J.L., Riding K.A., Juenger M.C.G., Folliard K.J., Schindler A.K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy. *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7. No.9.
3. Piradov K.A., Mamayev T.L., Kozhabekov T.A., Marchenko S.M. Fiziko-mekhanicheskiye, silovyye, energeticheskiye i strukturoformiruyushchiye parametry betona [Physico-mechanical, power, energy and structureforming parameters of concrete]. *Beton i zhelezobeton*. 2002. No. 2. Pp. 10–12. (rus)
4. Bezzubtseva M.M., Ruzhev V.A., Yuldashev R.Z. Elektromagnitnik mechanoactivation of dry construction mixes. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013. No 2. Pp. 241–245.
5. Stepanov S.V., Morozov N.M., Khozin V.G. Concrete hardening accelerator containing galvanic sludge [Uskoritel tverdeniya betona na osnove galvanicheskogo shlama]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8(34). Pp. 67–71. (rus)
6. Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Di Canio F. Mechanochemical activation of coal fly ash for production of high strength cement conglomerates. *Chemistry for sustainable development*. 2009. Vol. 17. No.6. Pp. 567–571.
7. Lotov V. A., Sydarev E.A., Kytygin V.A. Fiziko-khimicheskiye protsessy pri aktivatsii tsementno-peschanoy smesi v tsentrobeznom smesitele [Physico-chemical processes during activation of the cement-sand mixture in a centrifugal mixer]. *News of Higher Educational Institutions. Physics*. 2011. Vol. 54. No. 11/3. Pp. 346–349. (rus)

8. Plotnikov V.V., Krivoborodov Yu.R. Effektivnost domola tsementa v ustroystve dlya dispergirovaniya smesey [The effectiveness of the final grinding of cement in the device for dispersion mixtures]. *Tsement*. 1988. No. 12. Pp. 16–17. (rus)
9. Nagornyyak I.N. *Vliyaniye gidromekhanicheskoy aktivatsii tsementnykh vyazhushchikh na dolgovechnost betonov* [Impact hydro-mechanical activation of cement binders on the durability of concrete]. PhD thesis abstract. Saransk, 2006. P. 19. (rus)
10. Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T.C., Ravi Kumar B., Das S.K., Mehrotra S.P. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement. *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. No. 8. Pp. 679–685.
11. Sulimenko L.M., Shalunenko N.I., Urkhanova L.A. Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya vyazhushchikh kompozitsiy [Mechanochemical activation binding compositions]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1995. No. 11. Pp. 63–67. (rus)
12. Sajedi F., Abdul Razak H. Thermal activation of ordinary portland cement-slag mortars. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. No. 9. Pp. 4522–4527.
13. Qian J., Shi C., Wang Z. Activation of blended cements containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. No. 8. Pp. 1121–1127.
14. Rodionov R.B. Innovatsionnyye razrabotki rotorno-pulsatsionnoy tekhniki dlya proizvodstva stroitelnykh materialov [Innovative development of rotary-pulsation technology for manufacture of building materials]. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2006. No. 4. Pp. 24–25. (rus)
15. Andreyeva A.V., Davydova N.N., Burenina O.N., Petukhova Ye.S. Uluchsheniye kachestva melkozernistogo betona putem mekhanoaktivatsii tsementa [Improving the quality of fine-grained concrete by mechanical activation of cement]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Multisubject network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian University]. 2013. No. 94. Pp. 451–460. (rus)
16. Mashkin N.A., Gutareva N.A., Zibnitskaya N.Ye. Urusova T.A., Sharypov P.Yu. Vliyaniye aktivirovaniya tsementno-peschanykh suspenziy na fiziko-mekhanicheskiye svoystva melkozernistykh betonov [The effect of activation of cement-sand slurries on the physico-mechanical properties of fine-grained concrete]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2012. No. 11–12. Pp. 26–33. (rus)
17. Kumar S., Bandopadhyay A., Rajinikanth V., Alex T.C., Kumar R. Improved processing of blended slag cement through mechanical activation. *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. No.10. Pp. 3449–3452.
18. Ovcharenko G.I., Khizhinkova Ye.Yu., Gorn K.S. Vliyaniye aktivatsii tsementno-zolnykh kompozitsiy na prochnost kamnya [The effect of activation of cement-fly ash composition on the durability of stone]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010. No. 6. Pp. 9–13. (rus)
19. Prokopets V.S. Vliyaniye mekhanoaktivatsionnogo vozdeystviya na aktivnost vyazhushchikh veshchestv [Influence of mechanical activation effect on the activity of binding agents]. *Construction materials*. 2003. No. 9. Pp. 28–29. (rus)
20. Sajedi F. Effect of curing regime and temperature on the compressive strength of cement-slag mortars. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 549–556.
21. Solovyev V.I., Tkach Ye.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbayeva B.M., Seydinova G.A. Issledovaniye poristosti tsementnogo kamnya, modifitsirovannogo kompleksnymi organomineralnymi modifikatorami [Study of the porosity of cement paste, modified complex organic modifiers]. *Fundamental research*. 2014. No. 8. Pp. 590–595. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 63–69