

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., *Чашин Д.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: dmitriychashin11@gmail.com

ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ КВАРЦА НА ДЕГРАДАЦИЮ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния кварцевых заполнителей и наполнителей на термическую стойкость бетона. На основе экспериментальных данных показано, что кинетика твердения образцов бетона на основе кварца различной крупности в воде при 80 °С существенно отличается от твердения в нормальных условиях (20 °С). Коэффициент термостойкости образцов с ростом крупности частиц кварца в ряду 0–0,16 мм – 0,16–0,63 мм – 0,63–2,5 мм изменялся, соответственно, 1,15–1,40–0,84 через 12 мес испытаний. Установлено по изменению скорости прохождения ультразвука в исследуемых образцах, что на мелком кварцевом песке происходит формирование структуры, наиболее устойчивой при воздействии повышенной тепловой и влажностной нагрузок, что дает возможность значительно снизить интенсивность термической коррозии. Образцы бетона с крупным кварцем демонстрировали постепенную деградацию, а с тонкодисперсным кварцем – тенденцию к быстрому разрушению. Причиной деструкции в условиях термической коррозии являются процессы рекристаллизации гидратных фаз, сопровождающиеся растворением малоразмерных частиц гидратных новообразований с формированием более крупных и образованием α -гидрата двухкальциевого силиката, обладающего плохими вяжущими свойствами.

Ключевые слова: термическая коррозия, цементный камень, деградация, микроструктура, гидросиликаты, прочность.

Введение. Повышение температуры окружающей среды при одновременном воздействии влажности, близкой к 100 %-й, оказывает значительное влияние на физико-механические свойства и долговечность бетона, что обусловлено изменением структуры, пористости и фазового состава цементной матрицы. При этом происходит ухудшение прочностных показателей, снижение надежности и устойчивости изделий и конструкций [1–5]. Подобные условия наблюдаются при взаимодействии бетонных изделий с горячей водой в градирнях тепловых и атомных электростанций, используемых в оборотных системах водоснабжения и выполняющих функции тепло-массообменных устройств. При охлаждении воды путем распыления и непосредственного контакта с воздухом, происходит значительное воздействие на эксплуатационные свойства бетона [6–9]. На практике встречаются случаи размещения деривационных туннелей на большой глубине, например, на гидроэлектростанции Цирехатар в Синьцзяне (Китай), где максимальная глубина залегания туннеля превышает 1000 м. При этом туннели имеют типичную высокую температуру, характерную для контактирующих с ним пород, которая может превышать 80 °С [3].

Исследования показывают, что в условиях повышенной температуры и влажности разрушение бетонных конструкций может начаться через несколько лет после начала эксплуатации [10–

13], так как увеличивается скорость перекристаллизации и распада гидратных фаз, что способствует активизации деструктивных процессов, приводящих к падению прочности, росту пористости и проницаемости по всему объему цементного камня [14–17]. Поскольку движущей силой процесса рекристаллизации является разность растворимости между свободными частицами и контактами срастания гидратных фаз, соответственно, чем больше низкоосновных (малорастворимых) продуктов гидратации, тем более термостабильна система. Поэтому для замедления фазовых переходов при повышенных температурах и влажности необходимо использовать кремнеземсодержащие минеральные добавки в бетон, что позволит увеличить содержание низкоосновных гидросиликатов кальция.

В настоящее время вопрос о влиянии кварцевых заполнителей и наполнителей на термическую стойкость бетона мало исследован. В этой связи, данная работа посвящается изучению деградации структурно-механических свойств цементных систем с кварцем различной крупности при твердении в термовлажностных условиях.

Материалы и методы. Для исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент» ($C_3S=61,59\%$, $C_2S=14\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=13,73\%$; $HF=26\%$; начало схватывания 230 мин, активность 56,2 МПа), тонкодисперсный кварц ($S_{уд}=500\text{ м}^2/\text{кг}$); мелкий кварцевый песок фр. 0,16–0,63 мм; крупный кварцевый

песок фр. 0,63–2,5 мм. Изготавливали образцы мелкозернистого бетона 1:3 из смеси нормальной консистенции (ГОСТ 310.4-81): состав 2 – мелкий песок, В/Ц=0,5; состав 3 – крупный песок, В/Ц=0,35. Состав 1 – порошок бетона с тонкодисперсным кварцем (ПЦ:Кв=60:40, В/Ц=0,26), изготовленный из теста нормальной густоты (ГОСТ 310.3-81). Использовали образцы размером 2,5×2,5×10 см для определения прочности и 4×4×16 см для УЗ-контроля. Образцы твердели в водной среде при различных температурных условиях, в установленные сроки (1, 3, 6 и 12 мес) определяли предел прочности при сжатии и изгибе с помощью гидравлического пресса «ПГМ-100МГ4». Микроструктурные характеристики цементного камня исследовались с использованием растрового электронного микроскопа «Tescan Mira 3». Для определения скорости прохождения УЗ-сигнала при поверхностном прозвучивании бетонных образцов использовался ультразвуковой дефектоскоп «ПУЛЬСАР-2.2».

Основная часть. Полученные экспериментальные данные (табл. 1) свидетельствуют о том, что твердение образцов зависит от размера и удельной поверхности кварцевых частиц. Прочность при изгибе и сжатии цементных образцов на тонкодисперсном кварце при температуре воды 80 °С заметно превосходила твердение образцов на кварцевом песке, что вполне объяснимо, так как пылевидный кварц более активен. В нормальных условиях образцы порошкового бетона с тонкодисперсным кварцем также демонстрируют наибольшую прочность при сжатии по сравнению с другими составами. Наиболее слабое твердение в воде при 80 °С по сравнению с нормальным твердением, показали образцы с заполнителем из крупного кварцевого песка. Напротив, образцы с заполнителем из мелкого кварцевого песка лучше твердеют при температуре 80 °С, чем при 20 °С.

В нормальных условиях образцы мелкозернистого бетона (1:3) на крупном кварцевом песке занимают промежуточное положение: превосходят по прочности образцы бетона на мелком песке, что обусловлено в первую очередь пониженной водоотребностью, но уступают образцам на пылевидном кварце.

По данным прочности при сжатии рассчитан коэффициент термической стойкости (табл. 2), как отношение предела прочности образцов термовлажностного твердения к пределу прочности образцов нормального твердения: $K_{\text{терм.ст}} = R_{\text{сж}}^{80} / R_{\text{сж}}^{20}$. Как видно из приведенных данных в табл. 2 степень дисперсности частиц кварца оказывает существенное влияние на термическую стойкость образцов на основе портландцемента. Причиной повышения термической стойкости образцов с мелким и тонкодисперсным кварцем является значительная гидравлическая активность при повышенной температуре. Как показано в работе [16], молотый кварцевый песок имеет высокую гидравлическую активность близкую к активности опок при температуре 75 °С. Молотый песок значительно энергичнее взаимодействует с гидроксидом кальция, чем немолотый обычный кварцевый песок, в результате основность гидросиликатов кальция в цементном камне значительно ниже, а количество низкоосновных новообразований существенно возрастает, чем в образцах с мелким и тем более крупным кварцевым песком. В течение длительного воздействия повышенной температуры усиливается активное взаимодействие поверхности частиц мелкого зернистого кварца с гидроксидом кальция жидкой фазы цементного камня, что является причиной роста прочности. При твердении цементных образцов с крупным кварцевым песком подобное явление проявляется в меньшей степени.

Таблица 1

Кинетика твердения образцов в нормальных и термовлажностных условиях

№	Состав	Наполнитель/ заполнитель	В/Ц	20 °С				80 °С			
				1	3	6	12	1	3	6	12
Предел прочности при сжатии, МПа											
1	60:40	Фр.<0,16	0,43	44,7	49,2	52,89	56,49	42,1	76,76	69,31	65,13
2	1:3	Фр. 0,16–0,63	0,5	34,16	24,65	33,13	35,52	34,6	26,4	42,76	49,59
3	1:3	Фр. 0,63–2,5	0,36	36,16	41,60	38,51	50,00	36,73	43,12	30,14	41,8
Предел прочности при изгибе, МПа											
1	60:40	Фр.<0,16	0,43	22,17	20,9	20,7	22,46	10,78	29,2	26,71	24,8
2	1:3	Фр. 0,16–0,63	0,5	7,94	11,22	15,39	16,82	7,4	13,14	10,16	20,5
3	1:3	Фр. 0,63–2,5	0,36	14,18	17,84	19,91	19,45	3,9	9,53	19,95	11,12

У образцов с крупным песком после 6 мес твердения в воде при температуре 80 °С поверхностный слой приобрел рыхлую структуру,

наблюдалось выкрашивание частиц песка и цементного камня, изменение окраски (рис. 1). Образцы других составов не имели видимых следов структурных изменений в этот период. Однако,

после 8 мес термовлажностного твердения (80 °С) образец 4×4×16 см на пылевидном кварце самопроизвольно раскололся на 2 половинки,

при этом у образцов аналогичного состава размером 2,5×2,5×10 см до 12 мес никаких визуальных признаков разрушения не было обнаружено, что позволило провести их испытания на прочность.

Таблица 2

Коэффициент термической стойкости

№	Состав ПЦ:Заполнитель (наполнитель)	Размер частиц, мм	Время, мес			
			1	3	6	12
1	60:40	Фр.<0,16	0,94	1,56	1,31	1,15
2	1:3	Фр. 0,16-0,63	1,01	1,07	1,29	1,4
3	1:3	Фр. 0,63-0,25	1,02	1,04	0,78	0,84

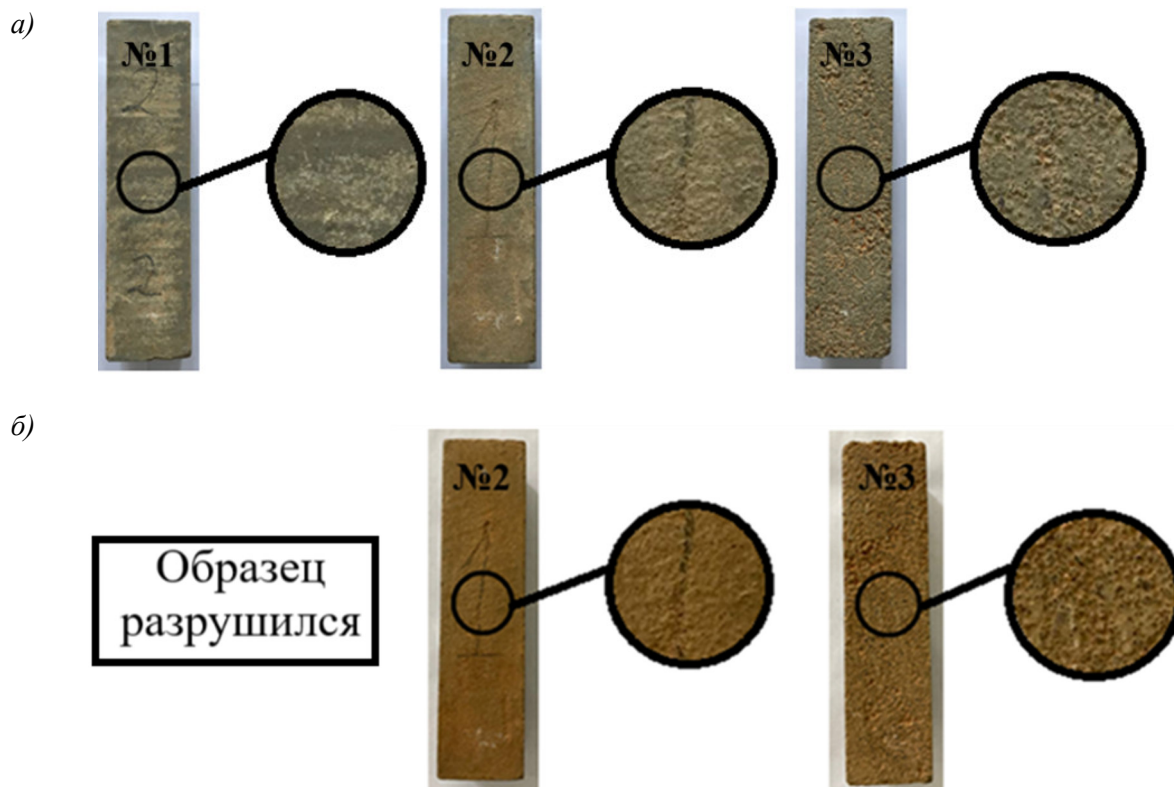


Рис.1. Образцы 4×4×16 см составов № 1-3 после 6 (а) и 12 мес (б) твердения при 80 °С

При исследовании термической коррозии весьма перспективным является применение импульсного ультразвукового метода. При этом определяется не механическая прочность, а интегральная характеристика, характеризующая комплекс структурно-механических свойств материала: прочность, пористость, трещинообразование, внутреннее напряжение структуры и т.д. При поверхностном прозвучивании образцов мелкозернистого и порошкового бетона были получены данные скорости прохождения УЗ-импульса в зависимости от времени твердения и температурно-влажностных условий (рис. 2).

Анализируя, приведенные на рис. 2 зависимости скорости распространения ультразвукового сигнала в цементных образцах с кварцем различной крупности при температуре 80 °С,

можно выделить основные этапы структурно-механических изменений. Характерно, что у всех составов *первый этап твердения* охватывает около месяца, типичным является скачкообразное изменение скорости УЗ-сигнала. Этот период связан с интенсивной гидратацией клинкерных минералов и ростом прочности, так как скорость процессов гидратации и степень гидратации вяжущего при повышенной температуре в наиболее активной фазе повышается.

Известно, что наиболее энергично на рост температуры реагируют минералы C_3A и C_4AF , при температуре 50 °С они гидратируются практически полностью в течение 1–3 сут [16]. Алит при 50 °С гидратируется на 90 %, а белит на 31 % к 7 сут, при более высокой температуре 90 °С алит гидратируется на 90 %, а белит на 22 % за 1

сут, при этом к 28 сут степень гидратации последнего достигает 87 %. Эти данные позволяют предположить, что наиболее активная фаза гидратации проходит в течение первых 1-2 недель, переходящая в более медленную фазу твердения и гидратации вяжущего, обусловленную формированием слоя из закристаллизованных гидратных новообразований, образующих плотную

оболочку вокруг частично гидратированных клинкерных частиц, препятствующую диффузии молекул воды, тем самым замедляя внутренний массообмен. Параллельно развиваются процессы взаимодействия извести с кремнеземом, ослабевающие по мере увеличения крупности частиц кварца.

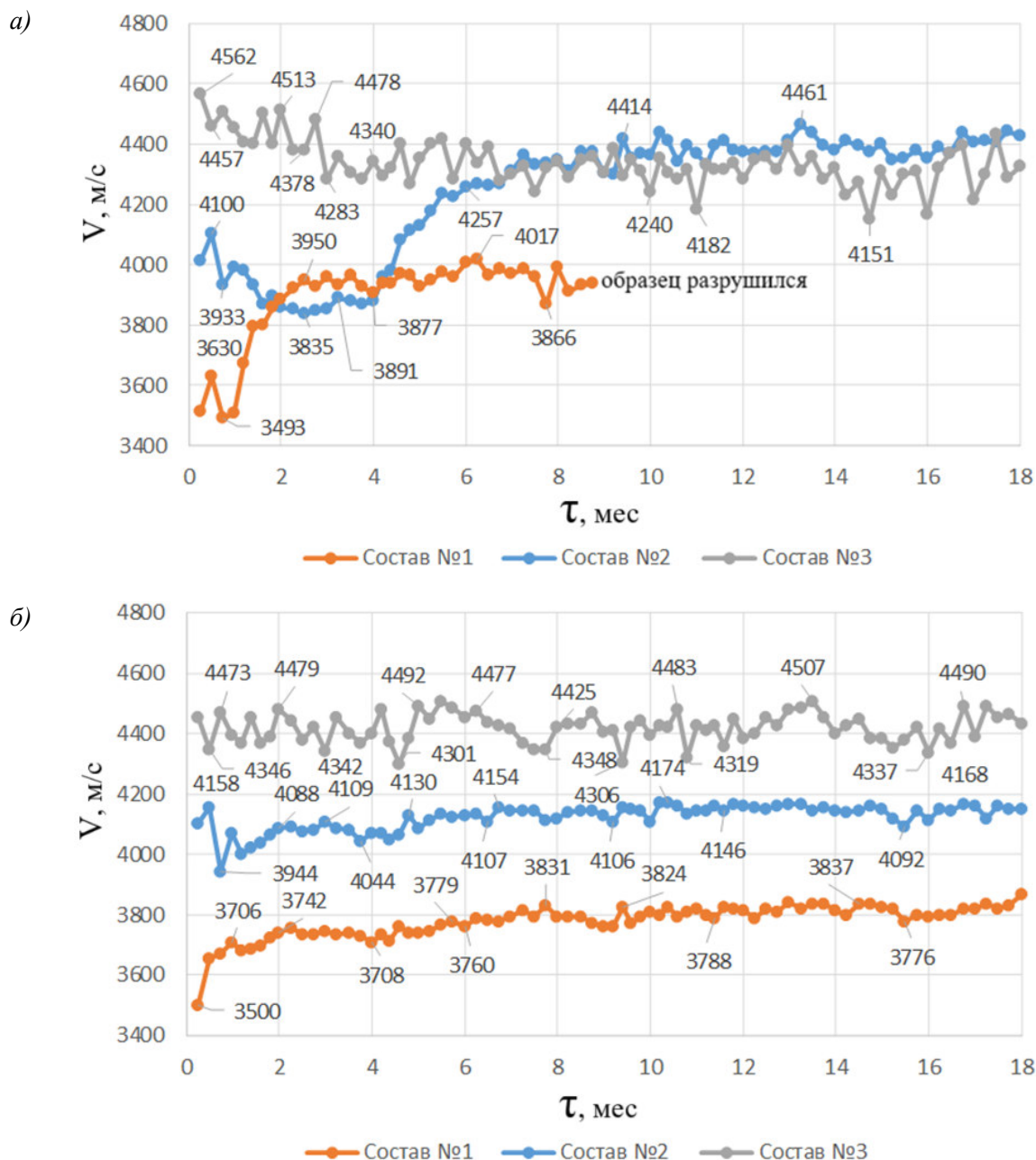


Рис. 2. Скорость прохождения УЗ-сигнала через образцы, твердевшие в воде при температуре 80 °C (а) и 20 °C (б)

Опираясь на приведенные данные (рис. 2) следует, что на *втором этапе твердения* (после 1 мес) характерный вид кривых скорости распространения ультразвукового сигнала существенно отличается в зависимости от дисперсности применяемого кварца. Причиной расхождений в структуре и свойствах затвердевших композитов

могут быть изменения основности гидросиликатов и количественного соотношения образующихся фаз. У образцов на пылевидном кварце наблюдается интенсивный рост скорости УЗ-сигнала на 200 м/с в течение от 1 до 2,5 мес, так как пылевидный кварц достаточно активно взаимодействует с известью с образованием низкоос-

новых силикатов тоберморитовой группы. Образцы мелкозернистого бетона 1:3 демонстрируют снижение УЗ-сигнала в течение от 1 до 4 мес: у образцов на мелком песке на 150 м/с, у образцов на крупном кварце скачкообразное снижение УЗ-сигнала на 280 м/с. Возможно снижение обусловлено тем, что преобладающим процессом является снижение числа гелевидных частиц и одновременный рост количества кристаллической фазы и размера кристаллов в цементном камне.

На 3-м этапе процессы структурообразования цементных систем также тесно связаны с размером применяемых кварцевых частиц. У образцов на пылевидном кварце этот период наблюдается от 2,5 до 7 мес, когда скорость УЗ-сигнала замедляется и остается практически на одном уровне. Следует учитывать, что структура цементного камня в процессе твердения при 80 °С непрерывно изменяется, возрастает скорость кристаллизационных процессов, а также образования и рекристаллизации новых фаз, параллельно развиваются как положительные (упрочнение), так и отрицательные деструктивные процессы, приводящие к снижению прочности, росту пористости и проницаемости. Выход кривой УЗ-сигнала на плато может свидетельствовать о балансе структурирующих и деструктивных процессов в образцах на пылевидном кварце.

У образцов мелкозернистого бетона 1:3 на мелком песке от 4 до 8 мес интенсивно растет скорость УЗ-сигнала на 470 м/с, что позволяет предположить, что мелкий кварцевый песок при высокой температуре в течение длительного периода приобретает активность по взаимодействию с известью. Чем меньше размер его частиц,

тем энергичнее кварц связывает гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации алита, понижая основность гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

У образцов на крупном кварцевом песке скорость УЗ-сигнала скачкообразно снижается на 100 м/с между 4 и 7 мес. Причиной падения скорости является формирование более грубодисперсной структуры новообразований, увеличение размера частиц гидратных фаз с сокращением числа контактов срастания за счет их растворения, обусловленной термодинамической нестабильностью. Это связано с тем, что процесс взаимодействия извести жидкой фазы цементного камня с крупными частицами кварца слабо выражен. Параллельно развиваются процессы межфазной перекристаллизации с образованием двухосновного α -гидрата C_2S .

4-й этап наблюдается после 7-8 мес у образцов мелкозернистого бетона 1:3. У образцов на крупном песке после 7 мес твердения наблюдается постепенный, скачкообразный спад скорости УЗ-сигнала, что свидетельствует о прогрессировании деструктивных процессов за счет разложения и перекристаллизации ранее сформированных метастабильных гидратных фаз. У образцов на мелком песке после 7 мес наблюдалась стабилизация значений скорости УЗ-сигнала с незначительными колебаниями. При этом спад показателей скорости прохождения УЗ-сигнала у образцов на пылевидном кварце после 7 мес завершился разломом испытуемого образца 4×4×16 см на две части, после 17,5 мес – на три части, после 18 мес – на 4 (рис. 3.).



Рис. 3. Разрушение образца 4×4×16 см на пылевидном кварце через 17,5 мес (а) и 18 мес (б) твердения в воде при 80 °С

Кривые скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах при твердении в воде при температуре 20 °С имеют схожий вид независимо от крупности частиц применяемого кварца: увеличение

скорости с последующей стабилизацией на протяжении всего временного интервала (рис. 2). Проведение ультразвуковых испытаний продемонстрировано на рис. 4.



Рис. 4. Ультразвуковая диагностика образца мелкозернистого бетона через 12 мес твердения в воде при 80 °С

Несмотря на то, что добавка тонкодисперсного кварца (40 %) в тампонажные растворы считается одной из наиболее эффективных для повышения их термической стойкости, как это было не раз отмечено специалистами [13–15], полученные нами результаты свидетельствуют о противоположном результате. Причина, возможно, обусловлена большим различием значений В/Ц. Для тампонажных растворов применяются смеси с высоким содержанием В/Ц (0,5 и более), в нашем эксперименте использовали образцы 4×4×16 см цементного камня с тонкодисперсным кварцем ПЦ:кв=60:40, изготовленные из теста нормальной густоты с В/Ц=0,26 (ГОСТ 310.3-81). При высоких значениях В/Ц появляющиеся в структуре внутренние напряжения гасятся благодаря повышенной пористости камня, но при низких значениях В/Ц (менее 0,5) внутренние напряжения в цементной матрице накапливаются, плохо релаксируют, что в результате привело к разрушению образца цементного камня с тонкодисперсным кварцем. Образцы меньшего размера 2,5×2,5×10 см аналогичного состава на тонкодисперсном кварце в течение 12 мес испытаний не претерпели видимых разрушений, так как внутренние напряжения в малых образцах скорее рассеиваются. Если используется кварцевый заполнитель, то это позволяет создать более устойчивую жесткую структуру.

Кроме того, тонкодисперсный кварц обладает более высокой активностью, по сравнению с мелко- и крупнозернистым кварцем, поэтому более интенсивно совершается переход высокоосновных гидросиликатов кальция C_2SH_2 в низкоосновные $CSH(B)$, при этом также происходит укрупнение кристаллов и образование некоторого количества высокоосновного $C_2SH(A)$, что в совокупности может спровоцировать спад прочности и самопроизвольный раскол образца.

Электронно-микроскопические исследования через 6 мес испытаний в горячей воде цементных образцов показали, что на контакте мелкозернистого и пылевидного кварца с цементным камнем (рис. 5) выделяется узкая зона 0,1–5 мкм хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция, прочно связанных с кварцевой подложкой, которые выделяются от остальной CSH -фазы упорядоченно расположенными волокнистыми частицами. Это свидетельствует о большой скорости растворения кремнеземистого компонента, при этом дисперсность частиц кварца играет значительную роль. С уменьшением размера зерен кварца увеличивается реакционная способность с гидратными фазами цементной матрицы, что способствует повышению количества гидросиликатов кальция низкой основности. У частиц крупного кварца подобный слой в контактной зоне прослеживается слабо.

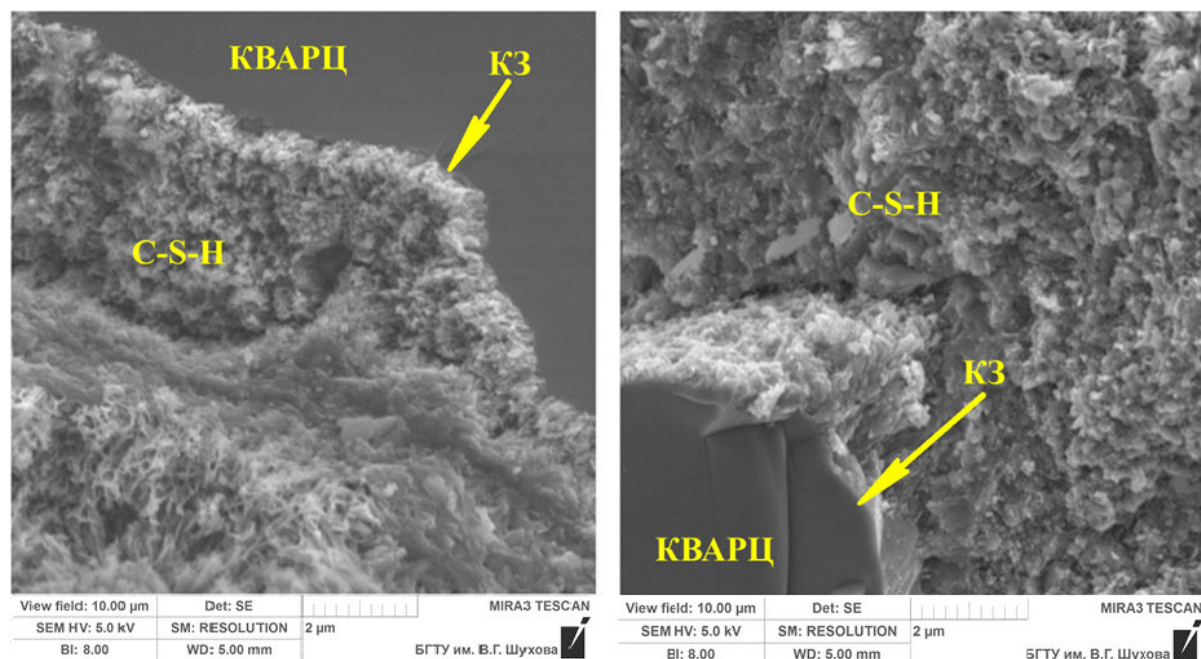


Рис. 5. Микроструктура зоны контакта мелкозернистого кварца (а) и микрокварца (б) с цементной матрицей; 6 мес; 80 °С

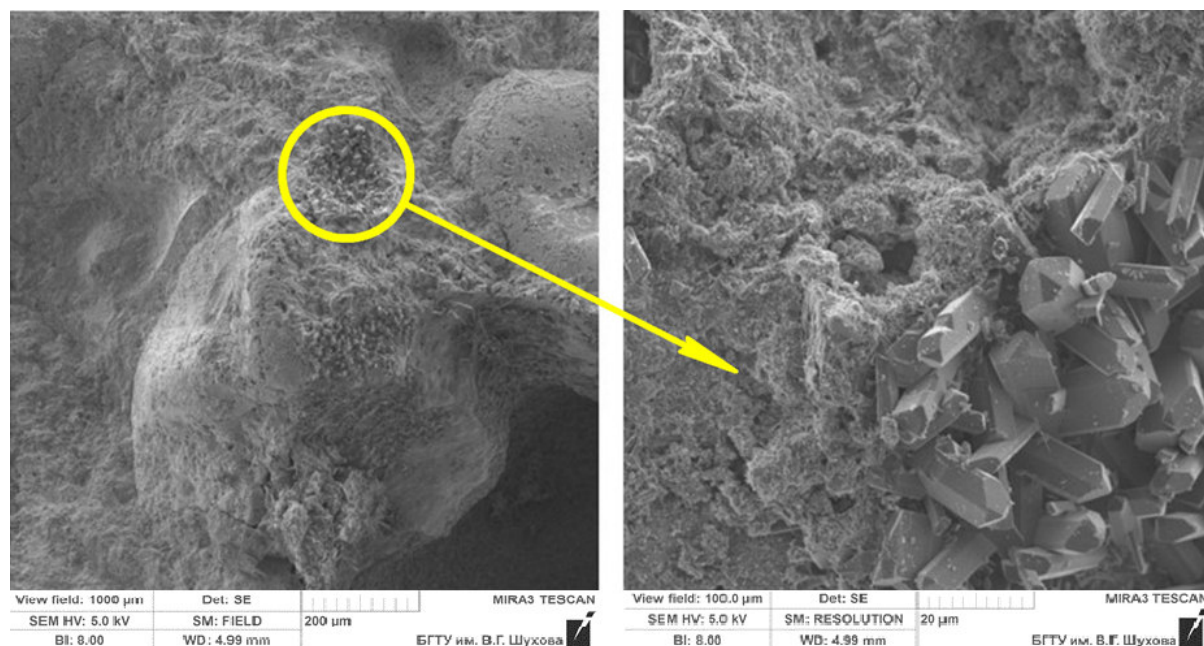


Рис. 6. Микроструктура мелкозернистого бетона (крупный кварц); гидросиликаты $C_2SH(A)$; 6 мес; 80 °С

При этом у образцов на крупнозернистом кварце в процессе перекристаллизации происходит неравномерное распределение частиц гидросиликатов кальция, с образованием друз с направленным ростом хорошо огранных призматических кристаллов, характерных для двухосновного α -гидрата C_2S (рис. 6). С повышением крупности кварцевого песка происходит уменьшение его удельной поверхности, что приводит к увеличению толщины цементной оболочки вокруг частиц заполнителя, по сравнению с более мелким песком. Сокращение удельной поверхности зернистого кварца уменьшает площадь контакта, где в основном наблюдается химическое взаимодействие гидратных фаз и прежде всего

гидроксида кальция при температуре 80 °С с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция. Следует также учесть, что растворимость кварца снижается с увеличением размера зерен. Это приводит к тому, что за пределами контактной зоны, где ослабевает влияние реакционной активности кварца, гидросиликаты в основном представлены продуктами с высокой основностью, которые термодинамически неустойчивы и перекристаллизуются в $C_2SH(A)$, что подтверждается данными микроструктуры на рис. 6. Скопления двухосновного гидросиликата $C_2SH(A)$ представлены крупными призматическими кристаллами (2–20 мкм), объединенными в друзы, малой удельной поверхностью и низким

числом контактов срастания, с плохими связующими свойствами.

Выводы. Кинетика набора прочности и термическая стойкость образцов порошкового и мелкозернистого бетона в условиях повышенной тепловой и влажностной нагрузок находится в тесной зависимости от крупности кварцевых частиц. К основным факторам, определяющим физико-химические процессы при длительном термовлажностном твердении, можно отнести размеры частиц кварца, соотношение между кварцевым заполнителем (наполнителем) и вяжущим, водоцементное отношение. Данные об изменении скорости прохождения ультразвука свидетельствуют о том, что на мелком кварцевом песке происходит формирование структуры, наиболее устойчивой в условиях воздействия повышенной тепловой и влажностной нагрузок, что дает возможность существенно снизить интенсивность термической коррозии. Образцы бетона с крупным кварцем подвержены в большей степени деструктивным изменениям, а с пылевидным кварцем продемонстрировали тенденцию к быстрому разрушению. Использование портландцемента с добавкой мелкого кварцевого песка фракции 0,16–0,63 мм позволяет резко замедлить процессы перекристаллизации гидратных фаз и резко повышает долговечность и стабильность физико-механических свойств бетонных изделий и конструкций в условиях повышенной относительной влажности воздуха и температуры.

Отмечая влияние кварцевого заполнителя (наполнителя) на термическую стойкость бетона следует отметить, что роль вяжущего при этом не снижается, как фактора, регулирующего взаимодействие цементного камня и заполнителей в процессе формирования эксплуатационно-строительных показателей бетона.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рябова Л.И. Тампонажные растворы повышенного качества // Бурение и нефть. 2003. С. 30–32.
2. Толыпина Н.М., Чашин Д.Ю. Деградация цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. №3 (37). С. 109–117.
3. Bai Y., Su H., Yin B., Yuebo C. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. Pp. 104906–104917. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104906.
4. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5597918.
5. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2021. Vol. 23. P. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225.
6. Промышленные тепловые электростанции / под ред. Е.Я. Соколова. М.: Энергия, 1979. 296 с.
7. Калатузов В.А. Проблемы обеспечения надежности железобетонных вытяжных башен градирен // Энерго-INFO. 2009. № 10(33).
8. Мазур В.А., Куценко Т.Н., Петров С.В. Выбор рационального метода ремонта монолитных железобетонных оболочек градирен с учетом использования различных средств подмазывания // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 6. С. 11–18.
9. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments // International Journal of Concrete Research. 2018. № 12(2). Pp. 145–159. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.
10. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Оптимизация процесса выбора типа цемента для изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211.
11. Славчева Г.С., Ким Л.В. Механизмы и закономерности изменения прочностных характеристик бетонов в связи с их температурно-влажностным состоянием // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2015. № 1(22). С. 63–68.
12. Толыпина Н.М., Чашин Д.Ю., Хахалева Е.Н. Особенности фазообразования в цементных системах при повышенных температурах и влажности // VII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», посвященная 170-летию В.Г. Шухова: сб. докл., Белгород, 12 апреля 2023 г. Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. С. 237–241.
13. Бабушкин В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1968. 187 с.
14. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов. М.: Недра, 1978. 293 с.
15. Рахимбаев Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов. Ташкент: Фан УзССР, 1976. 159 с.

16. Ge Z., Yao X., Wang X., Zhang W. Thermal performance and microstructure of oil well cement paste containing subsphaeroidal koniline flour in HTHP conditions // Construction and Building Materials. 2018. № 172. Pp. 787–794. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.268.

17. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. Pp. 103931–103947. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931.

Информация об авторах

Толыпина Наталья Максимовна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рахимбаев Шарк Матрасулович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чашин Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: dmitriychashin11@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.11.2024 г.

© Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю., 2025

Tolypina N.M., Rakhimbaev S.M., *Chashin D.Y.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: dmitriychashin11@gmail.com

THE INFLUENCE OF QUARTZ PARTICLE SIZE ON THE DEGRADATION OF CEMENT STONE UNDER HIGH TEMPERATURE AND HUMIDITY

Abstract. This article explores the effect of quartz aggregates and fillers on the thermal resistance of concrete. Experimental data indicate that the hardening kinetics of concrete samples with varying quartz particle sizes in water at 80 °C differ significantly from those in normal conditions (20 °C). The thermal resistance coefficient of samples increased with the particle size of quartz, from 0–0.16 mm to 0.16–0.63 mm to 0.63–2.5 mm, showing values of 1.15, 1.40, and 0.84, respectively, after 12 months of testing. Ultrasonic testing revealed that fine quartz sand forms a structure highly resistant to elevated thermal and moisture stress, which significantly reduces the rate of thermal corrosion. Concrete samples with coarse quartz exhibited gradual degradation, while those with fine quartz particles tended to degrade more quickly. The cause of destruction in conditions of thermal corrosion is attributed to recrystallization processes of hydrated phases, accompanied by the dissolution of small hydrate particles and the formation of larger particles, resulting in the formation of α -dicalcium silicate hydrate, which possesses poor binding properties.

Keywords: thermal corrosion, cement stone, degradation, microstructure, hydrosilicates, strength.

REFERENCES

1. Ryabova L.I. Tamponage Solutions of Increased Quality [Tamponazhnye rastvory povyshennogo kachestva]. Burenie and nef. 2003. Pp. 30–32. (rus)

2. Tolypina N.M., Chashin D.Y. Degradation of cement stone under conditions of elevated temperature and humidity [Degradatsiya tsementnogo kamnya v usloviyakh povyshennoy temperatury i vlazhnosti]. Bulletin of GSTOU. Technical sciences. 2024. No. 3 (37), Pp. 109–117. (rus)

3. Bai Y., Su H., Yin B., Yuebo C. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method. Journal of Building

Engineering. 2022. Vol. 57. Pp. 104906–104917. DOI: 10.1016/j.job.2022.104906.

4. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress. Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5597918.

5. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2021. Vol. 23. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225.

6. Industrial Thermal Power Plants [Promyshlennyye teplovye elektrostantsii]. ed. by E.Ya. Sokolov. Moscow: Energia, 1979. 296 p. (rus)

7. Kalatuzov V.A. Issues of Ensuring the Reliability of Reinforced Concrete Cooling Tower Exhaust Shafts [Problemy obespecheniya nadezhnosti zhelezobetonnykh vytyazhnykh bashen gradiren]. *Energo-INFO*. 2009. No. 10(33). (rus)

8. Mazur V.A., Kutsenko T.N., Petrov S.V. Selection of the Optimal Repair Method for Monolithic Reinforced Concrete Shells of Cooling Towers, Considering the Use of Various Scaffolding Means [Vybór ratsionalnogo metoda remonta monolitnykh zhelezobetonnykh obolochek gradiren s uchetom ispolzovaniya razlichnykh sredstv podmashchivaniya]. *Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020. No. 6. Pp. 11–18. (rus)

9. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments. *International Journal of Concrete Research*. 2018. No. 12(2). Pp. 145–159. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.

10. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Optimization of the Process of Selecting Cement Types for Products Operated in Aggressive Environments [Optimizatsiya protsessy vybora tipa tsementa dlya izdeliy, ekspluatiruyushchikhsya v aggressivnykh sredakh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 3. Pp. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. (rus)

11. Slavcheva G.S., Kim L.V. Mechanisms and Patterns of Strength Characteristics Changes of Concrete in Relation to Their Temperature and Humidity Condition [Mekhanizmy i zakonomernosti izmeneniya prochnostnykh kharakteristik betonov v svyazi s ikh temperaturno-vlazhnostnym sostoyaniem]. *Bulletin of the Engineering School of FEFU*. 2015. No. 1(22). Pp. 63–68. (rus)

12. Tolypina N.M., Chashin D.Yu., Khakhaleva E.N. Features of Phase Formation in Cement Systems at Elevated Temperatures and Humidity [Osobennosti fazoobrazovaniya v tsementnykh sistemakh pri povyshennykh temperaturakh i vlazhnosti]. VII International Scientific and Practical Conference "Science and Innovation in Construction," dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov: conference proceedings, Belgorod, April 12, 2023. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2023. Pp. 237–241. (rus)

13. Babushkin V.I. Physicochemical Processes of Concrete and Reinforced Concrete Corrosion [Fiziko-khimicheskiye protsessy korrozii betona i zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1968. 187 p. (rus)

14. Danushevsky V.S. Design of Optimal Compositions of Tamponage Cements [Proyektirovanie optimal'nykh sostavov tamponazhnykh tsementov]. Moscow: Nedra, 1978. 293 p.

15. Rakhimbaev Sh.M. Regulation of Technical Properties of Tamponage Solutions [Regulirovanie tekhnicheskikh svoystv tamponazhnykh rastvorov]. Tashkent: Fan UzSSR, 1976. 159 p. (rus)

16. Ge Z., Yao X., Wang X., Zhang W. Thermal Performance and Microstructure of Oil Well Cement Paste Containing Subsphaeroidal Koniline Flour in HTHP Conditions. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 172. Pp. 787–794. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.268.

17. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Pp. 103931–103947. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931.

Information about the authors

Tolypina, Natalia M. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Rakhimbaev, Shark M. Doctor of Technical Sciences, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Chashin, Dmitriy Y. Postgraduate student. E-mail: dmitriychashin11@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Received 10.11.2024

Для цитирования:

Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю. Влияние крупности частиц кварца на деградацию цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

For citation:

Tolypina N.M., Rakhimbaev S.M., Chashin D.Y. The influence of quartz particle size on the degradation of cement stone under high temperature and humidity. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 5. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17