

Д. т. н. И. Пундиене (✉), д. т. н. И. Пранцкевичене, А. Кайрите

Научный институт термоизоляции Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса, г. Вильнюс, Литва

УДК 666.974.2:666.762.852

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ SiC-ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ЖАРОСТОЙКОГО СРЕДНЕЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

Приведены результаты исследований свойств измельченного различными способами (помолом и дезинтегрированием) SiC на морфологию полученных частиц. Установлено, что измельченный дезинтегрированием SiC в количестве 10–20 % в составе жаростойкого бетона по сравнению аналогичным количеством молотого SiC улучшает механические свойства бетона после твердения и обжига от 11 до 23 %, снижает его усадку до 25 % и до 20 % повышает термостойкость.

Ключевые слова: SiC-заполнитель, способ измельчения заполнителя, алюминатный цемент, жаростойкий бетон.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве тепловых агрегатов наиболее часто используют жаростойкие бетоны. Важную роль при разработке составов жаростойких бетонов играет технико-экономический выбор оптимальных заполнителей. Наиболее доступные шамотные заполнители в ряде случаев не обеспечивают требуемых характеристик материала, таких как прочность, термостойкость при резкой смене температур, коррозионная стойкость, и обладают невысокими плотностью ($1,8\text{--}2,3\text{ кг/м}^3$) и пределом прочности при сжатии (26–30 МПа), высокими водопоглощением (6–10 %) и ТКЛР ($5,5\cdot 10^{-6}\text{--}6,0\cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$). Наилучшими характеристиками обладают карбидкремниевые заполнители, которые по экономическим соображениям можно получить из лома бывших в употреблении SiC-изделий. Такие изделия характеризуются высокими плотностью ($2,5\text{--}3,5\text{ кг/м}^3$) и прочностью при сжатии (до 80 МПа), низкими водопоглощением (3,5 %) и ТКЛР при 20–1000 °С ($3,5\cdot 10^{-6}\text{--}4,0\cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$), высокой коррозионной и термической стойкостью, не смачиваются расплавами [1]. Исследования показали, что [2] частичная замена (на 50 % от количества заполнителя) шамотного заполнителя на SiC в составе среднецементного жаростойкого бетона улучшает реологические

характеристики бетонного теста (на 12 %), повышает предел прочности при сжатии (на 10 %) и его термостойкость (на 30 %) по сравнению с термостойкостью бетона на шамотном заполнителе [3]. Однако, по другим данным [4], с увеличением количества добавки SiC фракции 5–10 мм от 10 до 30 % в составе жаростойкого бетона с алюмосиликатными заполнителями незначительно снижаются его плотность и прочность после обжига. Авторы [4] указывают на возможность снижения плотности за счет выгорания углерода и необходимость тщательного подбора зернового состава заполнителя.

Результаты исследований влияния количества углерода в SiC на термомеханические характеристики огнеупорных композитов показали [5, 6], что увеличение количества углерода в SiC значительно ухудшает термомеханические характеристики композитов. Известны также исследования [7, 8], указывающие на необходимость формирования на бетонах с SiC покрытий, защищающих заполнитель от процессов окисления при температурах выше 1300 °С. Установлено также, что присутствие несвязанного кремния в SiC-заполнителях улучшает термомеханические характеристики бетона [9].

Установлено, что для достижения лучших механических характеристик заполнителя по сравнению с традиционными дроблением и помолом целесообразно его измельчение в дезинтеграторе с применением способа механоактивации твердых веществ [10]. Этот способ обеспечивает активирование поверхности тонкодисперсных материалов в 1,5–2,0 раза, которое выражается



И. Пундиене
E-mail: ina.pundiene@gmail.com

в ряде случаев повышенной реакционной способностью в ходе последующих технологических операций [11]. Основным критерием активирования являются увеличение удельной поверхности материалов и, как следствие, изменение основных физико-механических свойств, облегчающих вступление таких материалов в твердофазные реакции с другими материалами. Однако максимальное количество приготовленного таким образом порошка обусловлено нормативными требованиями и принципами целесообразности применения дорогостоящего заполнителя, поскольку механоактивация частиц — это энергоемкий процесс и применение механоактивированного заполнителя значительно удорожает себестоимость жаростойкого бетона. Поэтому целесообразно только часть (до 20 %) шамотного заполнителя заменить на карбидкремниевый. Заменяв тонкодисперсные фракции молотого SiC-заполнителя на заполнитель, измельченный в дезинтеграторе, можно ожидать более высокие механические характеристики жаростойкого бетона. Поэтому цель настоящей работы — проведение сравнительных исследований жаростойкого бетона на основе алюминатного цемента с добавками измельченных различным способом SiC-заполнителей и контрольного состава бетона с шамотным заполнителем, оценка влияния способа измельчения SiC на основные свойства среднецементного жаростойкого бетона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Один из заполнителей на основе SiC получали в лабораторном дезинтеграторе-сепараторе DSL-115, состоящем из двух систем роторов диаметром 480 мм и трех рядов штырей/лезвий. Частота вращения роторов 3000 об/мин, скорость удара 150 м/с. Удельная энергия измельчения 25,2 кВт·ч/т. Механизм разрушения заполнителя можно разделить на несколько стадий: поперечное разрушение структуры в макромасштабе под воздействием ударных нагрузок и разделение заполнителя на более мелкие фрагменты. Другой заполнитель на основе SiC молотли в лабораторной шаровой мельнице.

Бетонную смесь готовили в специальном смесителе принудительного смешивания типа Хобарта (56 об/мин) вместимостью 20 л. Температура помещения и компонентов бетона составляла (20 ± 1) °С. Сухие компоненты смеси смешивали в течение 3 мин, затем доливали воду (75 % общего содержания воды) и перемешивали в течение 3 мин, затем доливали оставшуюся воду и перемешивали смесь в течение 3 мин. Смесь была уложена в формы размерами 70×70×70 и 40×40×160 мм. Параметры экзотермической реакции цементных паст с различными заполнителями определяли по методике фирмы Alcoa [12].

Физико-механические свойства образцов бетона оценивали по ГОСТ 20910 и LST EN 1402. Скорость прохождения ультразвукового импульса (УЗИ) в образцах определяли на приборе Pundit 7. Для исследований структуры образцов КК-Д и КК-М был использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-7600F фирмы JEOL (разрешение 1,5 нм). Предел прочности при сжатии жаростойкого бетона после 3-сут твердения, сушки и обжига при 800, 1000 и 1200 °С определяли на гидравлическом прессе ALPHA 3-3000 S в соответствии с требованиями LST EN 12390-3:2009. Термоциклы с нагревом до 800 °С и охлаждением между двумя водоохлаждаемыми металлическими плитами проводили на образцах размерами 40×40×160 мм [13]. Образцы в течение 40 мин находились в нагретой до 800 °С печи, а затем их охлаждали в течение 40 мин. После 1, 3 и 7 термоциклов определяли скорость УЗИ в образцах и рассчитывали снижение УЗИ после термоциклов по отношению к УЗИ после обжига при 800 °С.

При исследовании были использованы следующие материалы: микрокремнезем (МЗ) марки RW-Fuller (SiO₂ 96,1 %) со средним размером частиц около 150 нм; глиноземистый цемент Gorkal-70 (Г70, Al₂O₃ не менее 70 %) с насыпной плотностью 1100 кг/м³, удельной поверхностью 0,40 м²/г, минимальным количеством фракции мельче 63 мкм не менее 88 %, огнеупорностью не ниже 1630 °С; крупный шамотный (ШК) заполнитель (<10 мм) из шамотного кирпича марки ША (Al₂O₃ ≥ 30 %) путем дробления и отсева на ситах. Для снижения В/Ц в бетонах применяли дефлокулянт Castament FS 30 (F-30), относящийся к группе поликарбоксилатных эфиров.

SiC-заполнитель был получен из лома SiC-изделий. Химический состав лома, мас. %: SiC 96,2, SiO₂ 2,1, Al₂O₃ 1,2, Fe₂O₃ 0,3, CaO 0,2. Лом SiC-изделий имеет плотность 3120 кг/м³. Для исследований SiC готовили двумя способами — дезинтеграцией и помолом в шаровой мельнице. После обработки в дезинтеграторе полученный порошок (КК-Д) был просеян через набор сит (табл. 1). Полученный вторым способом заполнитель КК-М готовили помолом в лабораторной шаровой мельнице с дальнейшим просеиванием через сита (см. табл. 1) и сбором необходимого количества каждой из фракций таким образом, чтобы гранулометрический состав заполнителя КК-М соответствовал гранулометрическому составу заполнителя КК-Д. Установлено, что насыпная плотность обоих заполнителей различается: КК-Д 1270, КК-М 1300 кг/м³. Удельная поверхность КК-Д 0,30, КК-М 0,28 м²/г. Молотый шамот (ШМ) также готовили помолом в лабораторной шаровой мельнице. Насыпная плотность ШМ 1120 кг/м³, удельная поверхность 0,37 м²/г; гранулометрический состав ШМ представлен в табл. 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав КК-Д и ШМ

Материал	Количество, %, остатка на сите, мм							
	0,5	0,250	0,125	0,09	0,063	0,045	0,025	<0,025
КК-Д	2,5	10,6	17,3	19,0	20,5	9,8	12,9	8,4
ШМ	1,7	3,5	10,6	30,0	33,7	15,6	3,3	1,6

Для сравнительных исследований параметров гидратации цемента (времени и температуры экзотерма) в зависимости от применяемого заполнителя были проведены испытания трех составов (табл. 2). Для исследования влияния способа измельчения и количества заполнителя на физико-механические свойства бетона было приготовлено 9 составов (табл. 3). В первом контрольном составе *T* применяли только ШК и ШМ, в составах *P1-P4* в качестве молотого заполнителя — КК-М в количестве 5–20 %, в составах *Д1-Д4* — такое же количество КК-Д. Увеличение содержания КК-М и КК-Д осуществляли за счет снижения количества ШМ в составе. Количество воды в составах было постоянным и составляло 11,5 % (сверх 100 % сухих компонентов).

Для сравнения влияния способов обработки на морфологию частиц были проведены микроскопические исследования формы и поверхности частиц КК-Д и КК-М сразу после помола и обработки в дезинтеграторе (рис. 1). В образце КК-М (см. рис. 1, а) наблюдается большее количество мелких частиц (<5 мкм), чем в образце КК-Д (см. рис. 1, б). Форма частиц КК-Д (рис. 1, з) прямоугольная, частицы массивные, обладают развитой шероховатой поверхностью с множеством неровностей, дефектов и сколов. Форма частиц КК-М цилиндрическая (рис. 1, в), поверхность частиц ровная, практически не поврежденная. При 100000-кратном увеличении (см.

рис. 1, е) видно, что поверхность частиц КК-Д покрыта более крупными агломератами размерами 50–900 нм. Можно заключить, что способ обработки влияет на форму и размеры частиц — после обработки в дезинтеграторе получены более крупные частицы заполнителя прямоугольной формы с более развитой поверхностью.

Влияние заполнителей КК-Д и КК-М, их ускоряющее или тормозящее действие на процесс гидратации цемента определяли методом измерения температуры и времени экзотерма. Результаты исследований показали (рис. 2), что заполнитель ШМ (состав 1, см. табл. 2) менее, чем другие заполнители, замедляет процесс гидратации цемента. С заполнителем ШМ индукционный период длится 420 мин, экзотерма достигается через 525 мин, а температура экзотерма составляет 101 °С. Замена ШМ на КК-М в составе 2 почти на 50 мин продлевает процесс гидратации цемента и индукционный период длится 470 мин, время экзотерма 550 мин, а температура достигает 103 °С. Замена ШМ на КК-Д (состав 3) продлевает индукционный период до 500 мин, а экзотерма фиксируется через 600 мин, температура экзотерма достигает 110 °С. Сравнивая между собой влияние КК-М и КК-Д, можно заметить что частицы КК-Д на 6,4 % продлевают индукционный период и на 9 % время экзотерма, причем температура экзотерма возрастает на 9 °С, т. е. на 7,1 %. Известно, что частицы КК-М и КК-Д труднее смачиваются водой, чем частицы ШМ, что может влиять на перераспределение воды между зернами заполнителя и частицами цемента и задержку гидратации [14]. Возможно также влияние на процессы гидратации фактора обработки частиц, их поверхностной энергии [15]. Можно предположить, что форма и большие, чем у КК-М, удельная поверхность и дефектность частиц КК-Д влияют на время и температуру экзотерма в цементном тесте [16, 17].

Сравнительные исследования предела прочности при сжатии образцов всех составов, прошедших испытания после твердения в течение 3 сут, сушки и обжига при 800, 1000 и 1200 °С (рис. 3), показали, что образцы составов *T* с заполнителем ШМ, *P1* (заполнитель КК-М) и *Д1* (заполнитель КК-Д) обладают наименьшей прочностью. Очевидно, минимальные количества КК-М и КК-Д не способствуют увеличению прочности образцов, однако увеличение их количества от 10 до 20 % ведет к небольшому (4–8 % с КК-М) и большему (до 15 % с КК-Д) увеличению прочности после твердения. Влияние способа обработки заполнителя на прочностные характеристики подтверждается ранее проведенными исследованиями [18].

По сравнению с прочностью после твердения прочность образцов составов *T*, *P1-P3* и *Д1* после сушки снижается; в образцах остальных

Таблица 2. Составы цементного теста с заполнителями ШМ, КК-Д и КК-М для исследования экзотемпературы

Состав	Содержание, %				
	Г70	КК-М	КК-Д	ШМ	вода (сверх 100 % сухих компонентов)
1	50,0	–	–	50,0	20,0
2	50,0	50,0	–	–	20,0
3	50,0	–	50,0	–	20,0

Таблица 3. Составы бетонов с заполнителями ШМ, КК-Д и КК-М

Состав	Содержание, %						
	Г70	КК-М	КК-Д	МЗ	ШМ	ШК	F-30
<i>T</i>	12,0	–	–	5	30,0	53	0,1
<i>P1</i>	12,0	5	–	5	25	53	0,1
<i>P2</i>	12,0	10	–	5	20	53	0,1
<i>P3</i>	12,0	15	–	5	15	53	0,1
<i>P4</i>	12,0	20	–	5	10,0	53	0,1
<i>Д1</i>	12,0	–	5	5	25,0	53	0,1
<i>Д2</i>	12,0	–	10	5	20	53	0,1
<i>Д3</i>	12,0	–	15	5	15	53	0,1
<i>Д4</i>	12,0	–	20	5	10	53	0,1

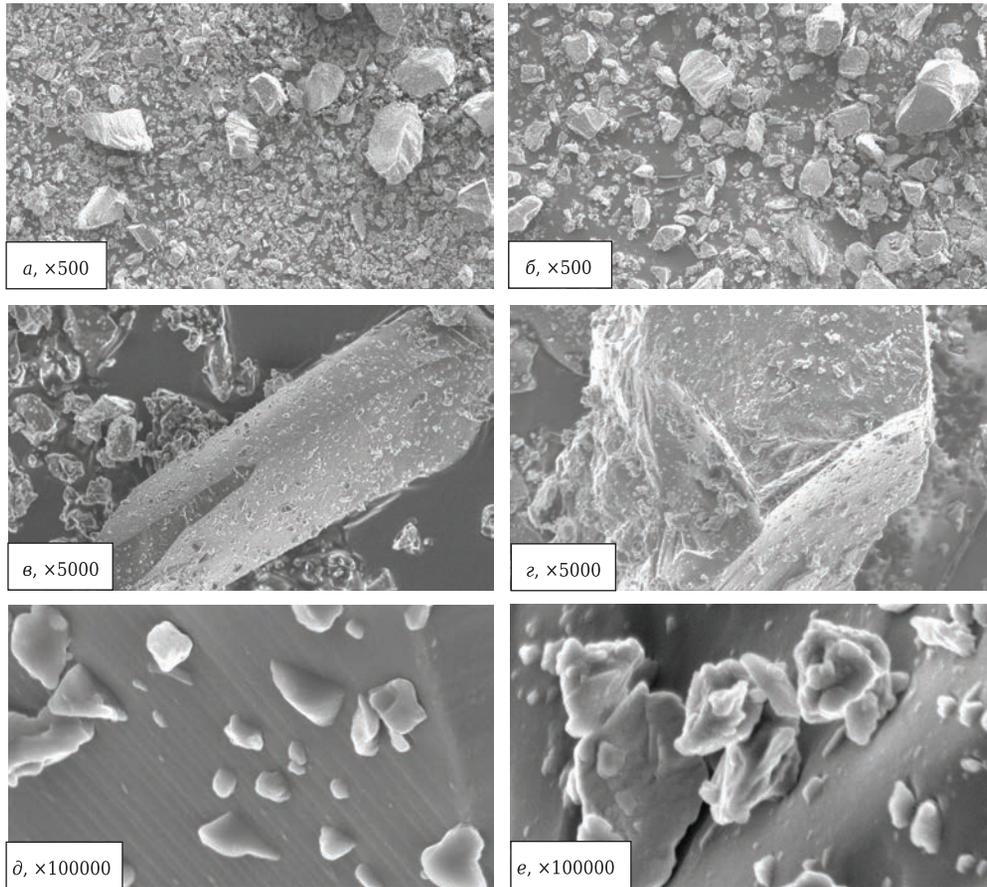


Рис. 1. Частицы КК-М (а, в, д) и КК-Д (б, г, е) при разном увеличении

составов наблюдается рост прочности. Таким образом, в составах Д2–Д4 и Р4 количество заполнителя, форма частиц и поверхностная энергия способствуют увеличению прочности образцов. Замена заполнителя ШМ на КК-М (составы Р2–Р4) повышает предел прочности при сжатии образцов в пределах 6,5–11,0 % по сравнению с образцами состава Т, а замена заполнителя ШМ на КК-Д (составы Д2–Д4) повышает аналогичные показатели на 6–19 %.

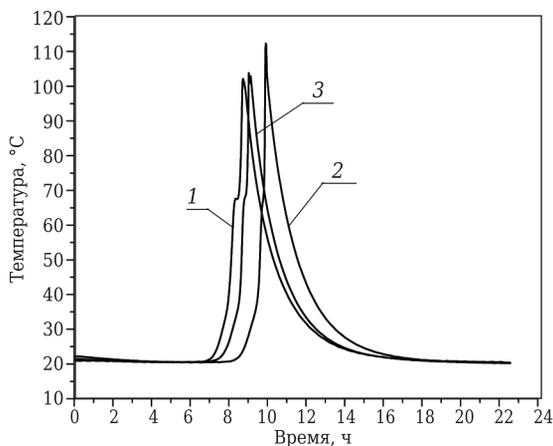


Рис. 2. Процесс гидратации в цементном тесте с заполнителями ШМ (1), КК-Д (2) и КК-М (3)

После обжига при 800 °С в образцах составов Р4 и Д2–Д4 наблюдается значительный прирост прочности по сравнению с образцами состава Т. В образцах составов Р1–Р2 и Д1 низкое количество заполнителя не оказывает позитивного влияния на прочность. Эффективность КК-М в сравнении с ШМ (составы Р2–Р4) составляет 3,0–5,5 %, а КК-Д (составы Д2–Д4) 11,5–19,5 % по сравнению с прочностью образцов состава Т. После обжига при 1000 °С во всех составах наблюдается значительное снижение прочности, связанное с полиморфными превращениями МЗ и рекристаллизацией цементных минералов.

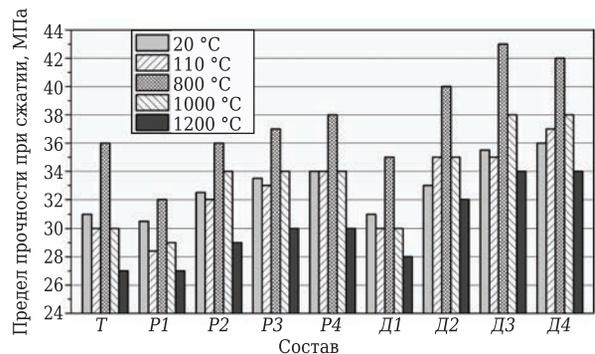


Рис. 3. Предел прочности при сжатии образцов составов Т, Р1–Р4 и Д1–Д4 после твердения, сушки и обжига

Однако и в данном случае значения прочности в образцах с КК-Д на 8,8–36 % выше, чем у образцов с КК-М, а наименьшей прочностью обладают образцы состава *T*. После обжига при 1200 °С прочность образцов снижается тем больше, чем меньше количество КК-М и КК-Д в составе. Значения прочности в образцах с КК-Д на 3,7–23 % выше, чем в образцах с КК-М. Наименьшей прочностью обладают образцы состава *T*. Значения прочности образцов составов *D2–D4* после обжига при данной температуре снижаются минимально, что указывает на позитивное влияние 10–15 % КК-Д на структуру образцов, улучшение сцепления заполнителя с цементной матрицей. Сравнивая эффективность равных количеств КК-М и КК-Д в составе, можно заметить, что повышение количества КК-Д в составе ведет к увеличению прочности образцов во всем интервале температур в среднем на 10–11 %; особенно это заметно для температур 800 и 1200 °С.

Результаты измерения плотности образцов показали, что повышение количества КК-Д и КК-М в составе ведет к увеличению плотности на 1,3–1,7 % после обжига при 1200 °С. Значения плотности образцов состава *T* составляют 1975, составов *P4* и *D4* 2000 и 2018 кг/м³ соответственно.

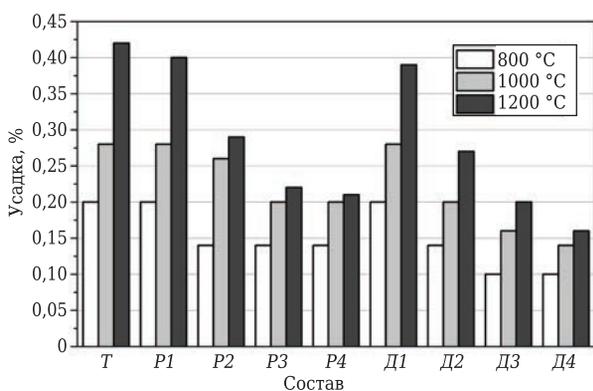


Рис. 4. Усадка образцов составов *T*, *P1–P4* и *D1–D4* после обжига при 800, 1000 и 1200 °С

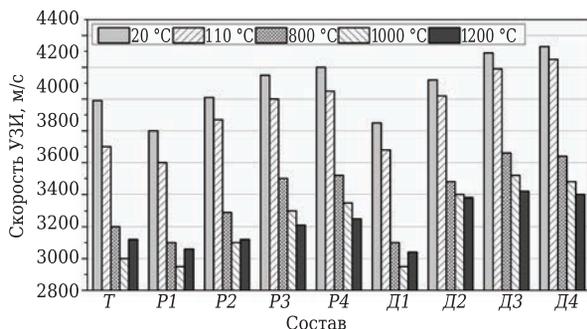


Рис. 5. Скорость УЗИ в образцах составов *T*, *P1–P4* и *D1–D4* после твердения, сушки и обжига при 800, 1000 и 1200 °С

Важным параметром является усадка. Повышение температуры обжига (800, 1000 и 1200 °С) увеличивает усадку образцов всех составов (рис. 4). По сравнению с образцами состава *T* заполнители КК-М и КК-Д пропорционально количеству в составе снижают усадку образцов после обжига. Наибольшее увеличение усадки наблюдается после обжига при 1200 °С. Усадка образцов состава *T* составляет 0,42 %, составов *P1–P4* 0,4–0,21 %, *D1–D4* 0,4–0,16 %. Очевидно, заполнитель КК-Д, особенно при его количестве 15–20 %, способствует снижению усадки образцов. Возможно, прямоугольная форма частиц КК-Д обеспечивает создание более устойчивого, менее подверженного деформациям структурного каркаса бетона.

Измерения скорости УЗИ в образцах бетона в основном подтверждают прочностные показатели и тенденции повышения скорости УЗИ с увеличением количества КК-М и КК-Д в составе. После твердения образцы всех составов обладают наибольшими значениями скорости УЗИ (рис. 5), процесс сушки вследствие удаления воды снижает скорость УЗИ в образцах составов *P1–P4* на 5,30–3,57 %, *D1–D4* на 4,20–1,85 %, состава *T* на 7,3 %. Обжиг при 800 °С снижает скорость УЗИ по сравнению с значениями после твердения в образцах составов *P1–P4* на 18,5–16,2 %, *D1–D4* на 12,4–15,8 %, состава *T* на 19,8 %. После обжига при 1000 °С снижение скорости УЗИ в образцах составов *P1–P4* составляет 22,4–20,2 %, *D1–D4* 23,4–19 %, состава *T* 24,8 %. После обжига при 1200 °С в образцах составов *T*, *P1–P2* и *D1* наблюдается небольшое увеличение скорости УЗИ (на 2–3 %) вследствие роста усадки, а в образцах составов *P3–P4* и *D2–D4* наблюдается дальнейшее снижение скорости УЗИ, также колеблющееся в пределах 2–3 %, поскольку увеличение усадки было незначительным. Следует отметить также, что после обжига при 1200 °С скорость УЗИ в образцах составов *P1–P4* заметно ниже (в пределах 3060–3250 м/с), чем в составах *D1–D4* (3040–3400 м/с), а в образцах состава *T* составляет 3120 м/с. Эти результаты подтверждают позитивное влияние КК-Д на структуру образцов.

Термостойкость образцов в большой мере зависит от скорости распространения трещин. Зарождение трещин в образце обуславливается ТКЛР и особенностями микроструктуры. При наличии структурных микротрещин распространение и рост термических трещин задерживаются, т. е. «технологические» микротрещины являются препятствием для распространения термических трещин [19]. Оценка термостойкости образцов бетонов (рис. 6) по изменению скорости УЗИ в образцах после 1-, 3- и 7-го термоциклов показала, что образцы составов *D2–D4* с КК-Д имеют преимущество по сравнению с образцами с ШМ и КК-М; скорость УЗИ в них после 7 термоциклов выше. Наибольшее снижение

скорости УЗИ в образцах происходит после 1-го цикла (рис. 7). Очевидно, образцы с ШМ подвержены большей деструкции, чем образцы с КК-М и КК-Д: по сравнению со скоростью УЗИ после 800 °С снижение скорости УЗИ после 1-го цикла в образцах с ШМ составляет 25 %, в образцах с КК-М 21,2–16,47 %, с КК-Д 17,5–12,1 %. Дальнейшее снижение скорости УЗИ после 3-го и 7-го циклов составляет 4–6 и 6–8 %. Очевидно, способ обработки заполнителя, позволяющий получить частицы прямоугольной формы с развитой поверхностью, влияет на термостойкость образцов, поэтому образцы составов Д2–Д4 меньше подвержены процессам деструкции и изменения структуры в них меньше, чем в образцах с ШМ и КК-М.

По результатам проведенных исследований можно заключить, что способ обработки заполнителя значительно влияет на физические свойства заполнителя, поэтому наиболее эффективным заполнителем является КК-Д, измельченный в дезинтеграторе, а добавка КК-Д в количестве 15–20 % позволяет достичь наиболее высоких прочностных и удовлетворительных усадочных показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что способ измельчения заполнителя значительно влияет на форму его частиц и удельную поверхность. В результате дезинтегрирования в КК-Д преобладают массивные частицы прямоугольной формы с развитой неровной поверхностью, а в результате помола в КК-М — частицы цилиндрической формы с очень ровной поверхностью.

Физические характеристики заполнителей КК-Д и КК-М влияют на ход гидратации алюминатного цемента. Заполнитель КК-М по сравнению с заполнителем ШМ продлевает процесс гидратации цемента, а заполнитель КК-Д — тормозит. Минимальное количество (5 %) заполнителей КК-М и КК-Д в составе бетона не превышает значений прочности контрольного состава на основе шамота после твердения, сушки и обжига при 800, 1000 и 1200 °С. Сравнивая эффективность равных количеств КК-М и КК-Д в составе, можно заметить, что увеличение количества КК-Д в составе ведет к росту прочности образцов во всем интервале температур от 11 до 23 %.

По сравнению с контрольным составом на основе шамота заполнители КК-М и КК-Д пропорционально количеству в составе снижают усадку образцов после обжига. Эффективному снижению усадки образцов способствует 15–20 % заполнителя КК-Д в составе. Увеличение количества заполнителей КК-М и КК-Д в составе бетона по сравнению с бетоном контрольного состава на основе шамота способствует уплотнению структуры и росту значений УЗИ.

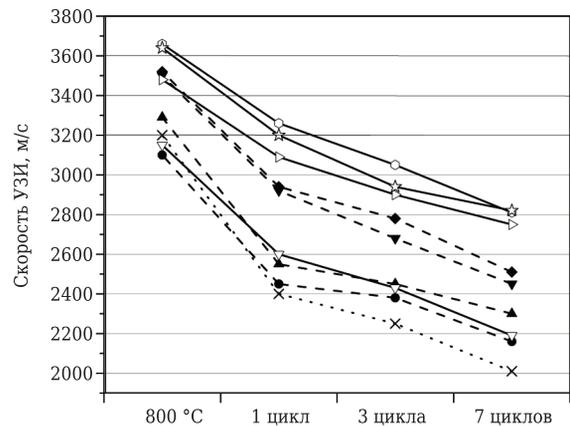


Рис. 6. Скорость УЗИ в образцах составов Т (x), P1–P4 (●, ▲, ▼, ◆) и D1–D4 (▷, ▽, ○, ☆) после обжига при 800 °С и термоциклирования

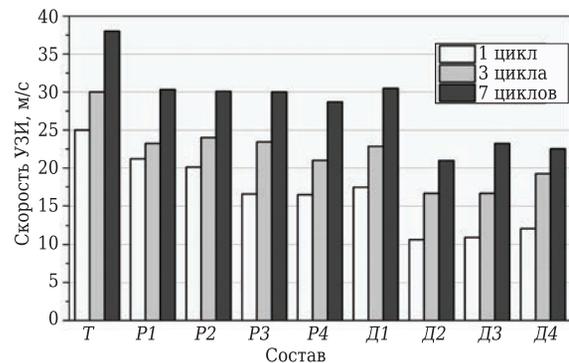


Рис. 7. Процентное соотношение падения скорости УЗИ в образцах составов Т, P1–P4 и D1–D4 после термоциклирования по отношению к скорости УЗИ после обжига при 800 °С

Способ обработки заполнителя КК-Д влияет на структуру бетона, поэтому образцы с КК-Д меньше подвержены деструкции в процессе испытаний на термостойкость. Оценка термостойкости образцов бетонов показала, что образцы с КК-Д имеют преимущество по сравнению с образцами с ШМ и КК-М. Возможно, прямоугольная форма частиц КК-Д способствует созданию более устойчивого, менее подверженного деформациям структурного каркаса бетона. Способ обработки SiC значительно влияет на физические свойства заполнителя, поэтому наиболее эффективной добавкой является SiC, измельченный в дезинтеграторе. Более высокие прочностные и низкие результаты усадки и термостойкости образцов достигнуты с количеством в бетоне 15–20 % SiC.

Библиографический список

1. Luz, A. P. Hot elastic modulus of Al₂O₃–SiC–SiO₂–C castables / A. P. Luz, M. Huger, V. C. Pandolfelli // Ceram. Int. — 2011. — Vol. 37. — P. 2335–2345.

2. **Гоберис, С.** Исследование физико-механических характеристик среднецементного жаростойкого бетона на шамотно-карбидкремниевых заполнителях и его практическое применение / С. Гоберис, И. Пундене, В. Антонович, Р. Стонис // Новые огнеупоры. — 2005. — № 9. — С. 59–63.

Goberis, S. Physicochemical properties of medium-cement refractory castables containing chamotte-silicon carbide fillers tested for practical applications / S. Goberis, I. Pundene, V. Antonovich, R. Stonis // Refractories and Industrial Ceramics. — 2005. — Vol. 46, № 5. — P. 333–337.

3. **Каменских, В. А.** Карбидкремниевые огнеупорные бетоны / В. А. Каменских, И. Д. Кащеев, Н. А. Митюшов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2005. — № 12. — С. 36–39.

Kamenskikh, V. A. Silicon carbide refractory castables / V. A. Kamenskikh, I. D. Kashcheev, N. A. Mityushov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2005. — Vol. 46, № 6. — P. 412–415.

4. **Durmus, C.** Evaluation of SiC additives in alumina-based castable refractories / C. Durmus, R. Mingu, S. Ozgen // Conference on Refractory Castables, Praha, 23–24 November 2001. — P. 41–45.

5. **Amin, M. H.** The effect of nanosized carbon black on the physical and thermomechanical properties of Al_2O_3 -SiC-SiO₂-C composite / M. H. Amin, M. A. Ebrahimabadi, M. R. Rahimpour // Journal of Nanomaterials — Special issue on nanocomposites for engineering applications. — 2009. — Vol. 2009. — P. 1–5.

6. **Luz, A. P.** Thermo-mechanical-chemical characterization of high-carbon-containing refractory castables / A. P. Luz, F. A. O. Valenzuela, V. G. Domiciano [et al.] // Journal of the Technical Association of Refractories, Japan. — 2009. — Vol. 29, № 2. — P. 3–7.

7. **Hundere, A. M.** Norway castables for kiln furniture / A. M. Hundere, B. Myhre, B. Sandberg [et al.] // Proc. of 3rd International Symposium on Refractories. — 1998. — P. 201–205.

8. **Bahloul, O.** Young's modulus evolution at high temperature of SiC refractory castables / O. Bahloul, T. Chotard, M. Huger [et al.] // J. Mater. Sci. — 2010. — Vol. 45. — P. 3652–3660.

9. **Karamian, E.** Influence of additives on nano-SiC whisker formation in alumina silicate-SiC-C monolithic refractories / E. Karamian, A. Monshi // Ceram. Int. — 2010. — Vol. 36. — P. 811–816.

10. **Shishkin, A.** Using of cavitation disperser, for porous ceramic and concrete material preparation / A. Shishkin, A. Korjakins, V. Mironovs // World Academy of Science,

Engineering and Technology International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. — 2015. — Vol. 9, № 5. — P. 540–543.

11. **Peetsalu, P.** Micropowders produced by disintegrator milling / P. Peetsalu, D. Goljandin, P. Kulu [et al.] // Powder Metall. — 2003. — Vol. 3. — P. 99–110.

12. Alcoa calcium aluminate cement test methods brochure. Revision 5. — Frankfurt : Available through Alcoa Industrial Chemicals. — 1999. — 16 p.

13. **Антонович, В.** Методические особенности оценки термостойкости различных типов жаростойкого бетона на шамотных заполнителях / В. Антонович, М. Шюкшта, И. Пундене, Р. Стонис // Новые огнеупоры. — 2011. — № 2. — С. 47–51.

Antonovich, V. Procedural elements in estimation of the thermal shock resistance of different types of refractory concrete based on chamotte filler / V. Antonovich, M. Shyukshita, I. Pundene, R. Stonis // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 1. — P. 70–74.

14. **Otroj, S.** The effect of deflocculants on the self-flow characteristics of ultra low-cement castables in Al_2O_3 -SiC-C system / S. Otroj, M. A. Bahrevar, F. Mostarzadeh [et al.] // Ceram. Int. — 2005. — Vol. 31. — P. 647–653.

15. **Mehrotra, S. P.** Mechanical activation of gibbsite and boehmite: new findings and their implications / S. P. Mehrotra, T. C. Alex, G. Greifzu [et al.] // Transactions of the Indian Institute of Metals. — 2016. — Vol. 69, № 1. — P. 51–59.

16. **Terada, K.** Physicochemical properties and surface free energy of ground talc / K. Terada, E. Yonemochi // Solid State Ionics. — 2004. — Vol. 172. — P. 459–462.

17. **Cao, J.** Influence of mechanochemical effect on physical properties of boiler bottom slag. Cailiao Kexue Yu Gongyi / J. Cao, Y. Fang, R. Fan [et al.] // Mater. Sci. Technol. — 2015. — Vol. 23, № 4. — P. 111–114.

18. **Bumanis, G.** Compressive strength of cement mortar affected by sand microfiller obtained with collision milling in disintegrator / G. Bumanis, D. Bajarea // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 172. — P. 149–156.

19. **Соков, В. Н.** Высокотемпературная теплоизоляция нового поколения / В. Н. Соков, В. В. Соков // Промышленная тепловая изоляция. Применение и производство : науч.-техн. конф., Москва, 2004 г. / ОАО «Теплопроект». — 2004. ■

Получено 21.07.17

© И. Пундиене, И. Пранцкевичене,
А. Каўрите, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

25-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО МЕТАСТАБИЛЬНЫМ, АМОΡФНЫМ И НАНОСТРУКТУРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

2–6 июля 2018 г. г. Рим, Италия

ISMANAM

Roma 2-6 July 2018

25TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON METASTABLE, AMORPHOUS AND NANOSTRUCTURED MATERIALS

<http://ismanam2018.ism.cnr.it/>