

Научная статья
УДК 666.974.2
DOI: 10.14529/build240105

НИЗКОЦЕМЕНТНЫЙ ОГНЕУПОРНЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ КАОЛИНОВОГО ШАМОТА С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТИ

В.А. Абызов, abyzovva@susu.ru

И.Е. Лещенко, igor1024a@gmail.com

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе приведены результаты разработки шамотного низкоцементного жаростойкого бетона на основе каолинового шамота. Получен бетон с наибольшей температурой применения до 1500 °С. Установлено, что применение узких фракций шамота с низкой (менее 5 %) водопотребностью обеспечивает получение низкоцементного бетона с высокими показателями подвижности бетонной смеси. Исследовано влияние добавок триполифосфата натрия, реактивного глинозема и суперпластификаторов на нафталиновой и поликарбоксилатной основе на растекаемость бетонной смеси и основные жаростойкие свойства бетона. Показано, что использование триполифосфата натрия в наибольшей степени способствует процессам спекания цементного камня в бетоне. Разработанный жаростойкий бетон характеризуется высокими показателями прочности при сжатии (более 50 МПа после первого нагрева до рабочих температур) и термостойкости (не менее 20 водных теплосмен).

Ключевые слова: низкоцементный огнеупорный бетон, неформованные огнеупоры, гранулометрический состав, высокоглиноземистый цемент, шамотный заполнитель

Для цитирования. Абызов В.А., Лещенко И.Е. Низкоцементный огнеупорный бетон на основе заполнителя из каолинового шамота с улучшенными показателями удобоукладываемости // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 1. С. 34–39. DOI: 10.14529/build240105

Original article
DOI: 10.14529/build240105

LOW-CEMENT FIRECLAY CASTABLE WITH IMPROVED PERFORMANCE

V.A. Abyzov, abyzovva@susu.ru

I.E. Leshchenko, igor1024a@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of developing low-cement fireclay concrete based on kaolin chamotte. As a result, concrete with the highest application temperature of up to 1500 °C was obtained. The use of narrow fractions of chamotte with low (less than 5%) water demand ensures the production of low-cement concrete with high rates of mobility of the concrete mixture. The research focused on the influence of the additions of sodium tripolyphosphate, reactive alumina and superplasticizers based on naphthalene and polycarboxylate on the spreadability of the concrete mixture and the basic heat-resistant properties of concrete. The use of sodium tripolyphosphate most contributes to the sintering processes of cement stone in concrete. The developed heat-resistant concrete is characterized by high compressive strength (more than 50 MPa after the first heating to operating temperatures) and heat resistance (at least 20 water heat cycles).

Keywords: low-cement concrete, refractory concrete, unformed refractories, refractory properties, granulometric composition, high-alumina cement, refractories, fireclay aggregate

For citation. Abyzov V.A., Leshchenko I.E. Low-cement fireclay castable with improved performance. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(1):34–39. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240105

Введение

Начиная с 1980-х годов во всем мире наметилась устойчивая тенденция к увеличению доли «неформованных огнеупоров» (жаростойких и огнеупорных бетонов) в общем объеме огнеупорных материалов [1–3]. Это было вызвано как общими преимуществами бетона перед штучными изделиями (отсутствием обжига, технологичность, ускорение работ по выполнению огнеупорных футеровок, возможность быстрого создания футеровки сложной формы), так и достоинствами жаростойкого бетона в целом (выше термическая стойкость, меньше количество швов в футеровке) [1–4].

Решение задач по понижению расхода огнеупорных вяжущих, уменьшению усадочных деформаций и повышению стойкости бетона при повышенных температурах привело за счет широкого использования тонкомолотых добавок (корунда, шпинели и муллита) к возникновению нового класса бетонов – низкоцементных жаростойких и огнеупорных бетонов [1, 2, 5, 6].

Разработка и применение подобного бетона требует заполнителей и дисперсных, тонкомолотых наполнителей с пониженной водопотребностью. Были успешно разработаны и в настоящее время широко применяются в промышленности жаростойкие и огнеупорные бетоны на корундовом, шпинелидном заполнителе и их смесях, муллите, табулярином глиноземе, плавящихся высокоглиноземистых заполнителях [1, 5–12]. Для бетона, предназначенного для эксплуатации в области температур 1300–1450 °С, применение таких огнеупорных заполнителей явно избыточно, но муллит и муллитокорунд применяют вместо шамота из-за низкой водопотребности. Пониженная водопотребность позволяет получать саморастекающиеся бетонные смеси. Водопотребность рядового шамотного заполнителя классов Б и А существенно выше, чем указанных заполнителей, а содержание пыли в шамоте может достигать 10 %. Начиная с 1990-х гг. в России применяют жаростойкие и огнеупорные бетоны, полученные из смесей с повышенными показателями удобоукладываемости – самовыравнивающиеся [13–16], затем в ГОСТы 344470 и 52541 официально вводится понятие «саморастекающихся» (самовыравнивающихся) бетонных смесей. Для таких смесей особенно критичными являются водопоглощение заполнителя и наличие в нем пылеватых частиц. Таким образом, вопросы расширения сырьевой базы для получения шамотного жаростойкого и огнеупорного бетона с использованием саморастекающихся смесей весьма актуальны.

Целью данной работы являлось изучение возможности получения на шамотном заполнителе с пониженным водопоглощением жаростойкого низкоцементного бетона с температурой применения до 1500 °С.

Материалы и методы проведения исследований

Для обеспечения низкого водотвердого отношения (В/Т) необходим шамотный заполнитель с небольшим, не более 5 %, водопоглощением. Рядовой шамот (как первичный, так и вторичный) различных производителей Уральского региона имеет водопоглощение, существенно превышающее указанное значение. Исключение составляет плотный, хорошо спеченный каолиновый шамот. В работе был использован заполнитель каолиновый шамотный ШК-42 производства ООО «Кыштымский каолин» с водопоглощением 3 %. Основные свойства заполнителя – массовая доля Al_2O_3 42 %, огнеупорность 1750 °С, данные показатели удовлетворяют требованиям к шамоту класса А по ГОСТ 23037. При выборе фракций и подборе составов были использованы данные, ранее полученные при разработке корундовых бетонов [5, 8–11]. В работе применяли фракционированный шамот в виде узких фракций (тонкомолотый, 1–3 мм, 3–6 мм).

Цемент высокоглиноземистый марки ВЦ-70 (ВГЦ) производится ИЦ АС «Теплострой» (г. Челябинск) по ТУ-21-20-60-84. Цемент характеризуется следующими параметрами: массовая доля Al_2O_3 71,2 % (по ТУ-21-20-60-84 – не менее 70 %), прочность при сжатии в 24 ч – 26 МПа, в возрасте 3 сут. – 40 МПа, огнеупорность не менее 1700 °С). Выбор данного вида ВГЦ обусловлен тем, что это местное производство, а собственно цемент характеризуется достаточно высокой активностью, удовлетворяя в части прочности требованиям как ТУ-21-20-60-84, так и ГОСТ 969-2019.

С целью повышения предела прочности бетона при высоких температурах была использована добавка, улучшающая процессы спекания и обеспечивающая формирование в структуре цементного камня бонита CA_6 и корунда – реактивный глинозем (РГ) по ТУ 14-194-280-2022. Для обеспечения высоких показателей подвижности бетонной смеси в работе использовали суперпластификаторы производства СП-1 (С-3) по ТУ 5870-002-58042865-03 производства ООО «Полипласт-УралСиб», Melfluxe 1641 F производства BASF Construction Additives. Кроме того, была изучена возможность применения в качестве водоредуцирующей добавки триполифосфата натрия (ТПФН) по ГОСТ 13493-86, широко используемого в бетонах на корундовом заполнителе. Для предварительного выбора добавок применяли также образцы-кубы с ребром 20 мм из цементного камня, полученные из теста нормальной густоты (в суточном и 3-суточном возрасте нормального твердения).

Расчет состава низкоцементного шамотного бетона проводился с использованием ранее разработанных методик и на основе ряда исследований в области разработки самоуплотняющихся бетонов [8–12, 17–19]. Оценка параметров удобоукладываемости бетонных смесей проводилась по методике ГОСТ Р 52541–2006, средней плотности –

согласно ГОСТ 10181–2014. Методика подготовки образцов была максимально приближена к требованиям, предъявляемым к современным низкоцементным бетонам на ВГЦ (твердение 24 ч в формах, далее распалубка и сушка 24 ч при температуре 105 °С). Прочностные параметры определяли согласно ГОСТ 10180-2012 на стандартных образцах-кубах с ребром 70 мм, термостойкость – после первого нагрева бетона до температуры применения, чтобы обеспечить завершение процесса спекания, по ГОСТ 20910–2019 (водные теплосмены после нагрева до 800 °С). Температуру применения определяли по величине температуры деформации под нагрузкой, соответствующей 0,2 МПа по методике ГОСТ 2091-2019.

Разработка низкоцементного бетона

Предварительную оптимизацию расхода добавок-суперпластификаторов проводили с использованием ранее выполненных работ [20, 21] и результатов, полученных на образцах из цементного камня (оптимизация расхода добавок). Для бетона контрольного состава была использована смесь, содержащая 88 % каолинового шамота нормированного зернового состава и 12 % ВГЦ. Далее изучали влияние добавки СП-1 (0,6 %, состав 2), ТПФН (0,2 %, состав 3), совместное влияние ТПФН и РГ (состав 4; 0,2 и 7 % соответственно), ТПФН, РГ и СП-1 (состав 5; 0,2, 7 и 1 % соответственно), а также совместное влияние ТПФН, РГ и суперпластификатора Melfluxe 1641 F на поликарбоксилатной основе (состав 6; 0,2, 7 и 1 % соответственно). При введении РГ соответствующим образом уменьшали расход цемента, таким образом, суммарный расход вяжущего (ВГЦ + реактивный глинозем) во всех исследуемых составах был 12 %.

Далее, меняя расход воды при фиксированном расходе добавок (расход – максимальный, на основе предварительных данных, полученных на цементном камне), добивались стандартной растекаемости бетонной смеси в 260 мм по ГОСТ Р 52541-2006. Сравнительные результаты, полученные при проведении эксперимента, приведены в табл. 1.

На основании полученных данных (см. табл. 1) можно сделать следующие выводы: плотность бетонной смеси в 2310 кг/м³ является максимальным

значением, соответствующим плотной упаковке (известно, что плотность смесей около 2300 кг/м³ характерна для бетонов на муллитно-кремнеземистом заполнителе, на шамоте обычно ниже, около 2200 кг/м³). Только при совместном введении добавок обеспечиваются высокие показатели (плотность около 2300 кг/м³ при расходе воды 12,5–12 %).

Введение СП-1 позволило уменьшить В/Т отношение незначительно (расход воды 15,5 % в составе 2), более эффективно использование ТПФН (расход воды понизился на 3,5 % относительно контрольного состава). При совместном использовании РГ и ТПФН расход воды упал на 4,5 %, хотя сам по себе РГ не является пластифицирующей добавкой. То есть с точки зрения улучшения реологии смеси, совместно добавки РГ и ТПФН действуют эффективнее, чем чистый триполифосфат натрия. Дополнительное введение добавки СП-1 в комплекс «ТПФН и РГ» (состав 4) не приводит к существенному снижению расхода воды затворения, но позволяет его уменьшить на 1 %. Наиболее эффективным оказался комплекс добавок ТПФН, Melfluxe 1641 F и РГ (состав 6), использование добавки на поликарбоксилатной основе позволило снизить расход воды еще на 0,5 %.

Действие добавок на плотность упаковки в бетонной смеси (плотность смеси, см. табл. 1) в целом коррелируется с влиянием на В/Т отношение. Наименьшие значения плотности у контрольного состава – 2050 кг/м³, что соответствует обычному среднецементному бетону на шамоте. Использование ТПФН и СП-1 уплотняет смесь до уровня 2120–2180 кг/м³, что соответствует среднецементным шамотным бетонам с добавками суперпластификаторов. Совместное использование добавок (составы 4–6) обеспечивает максимально плотную упаковку и плотность на уровне 2300 кг/м³ – соответствующую расчетным значениям (значения 2280 и 2310 отличаются менее чем на 1,5 %, что находится в пределах ошибки измерения).

Далее для низкоцементного шамотного бетона контрольного состава и составов с наиболее плотной упаковкой (составы 4–6) было изучено изменение предела прочности в процессе нагревания (табл. 2). Данные для температур 800–1100 °С не приведены, так как спекания при этих температурах не зафиксировано.

Таблица 1

Влияние добавок на основные свойства низкоцементной бетонной смеси

Номер состава	Растекаемость смеси, мм (ГОСТ Р 52541-2006)	Плотность смеси, кг/м ³	Расход воды, % от массы сухой смеси
1	260	2050	17,5
2	260	2120	15,5
3	260	2180	14
4	260	2310	13
5	260	2310	13
6	260	2280	12,5

Таблица 2

Изменение предела прочности шамотного низкоцементного бетона при первом нагреве

Режим твердения и нагревания	Прочность при сжатии, МПа, для состава			
	1	4	5	6
Сушка 24 ч, 105 °С	2,1	4,0	3,4	2,2
Сушка 24 ч и нагрев до 1200 °С	16,0	38,9	25,4	28,8
Сушка 24 ч и нагрев до 1400 °С	18,3	48,6	31,2	39,8
Сушка 24 ч и нагрев до 1500 °С	19,2	52,5	33,1	41,8

Таблица 3

Жаростойкие свойства низкоцементного бетона на каолиновом шамоте

Параметр	Номер состава по табл. 1			
	1	4	5	6
Прочность при сжатии после нагрева до 1500 °С, МПа	19,2	52,5	33,1	41,8
Усадка после сушки при 105 °С, %	0,2	0,1	0,2	0,2
Усадка после обжига при 1500 °С	0,6	0,2	0,3	0,4
Термостойкость, водные теплосмены 800 °С – вода (по ГОСТ 20910)	6	22	16	18
Марка по термостойкости, ГОСТ 20910	T ₁₅	T ₂₀	T ₁₅	T ₁₅
Температура деформации под нагрузкой 0,2 МПа (4 %-ной), °С, не менее	1450	1450	1450	1450
Максимальная температура применения, °С	1500	1500	1500	1500

Контрольный состав (состав 1 по табл. 1), содержащий значительное количество тонкомолотого шамота при низком расходе цемента (15 %, что примерно соответствует 300 кг/м³), в суточном возрасте показал минимальную прочность – 2 МПа. Низкие значения прочности при сжатии после сушки для бетона всех составов обусловлены короткими сроками твердения и низким расходом вяжущего (15 % от массы сухих компонентов, что примерно соответствует расходу в 300 кг/м³). Как величина распалубочной прочности – данные значения являются приемлемыми.

В дальнейшем прочность бетона контрольного состава повысилась за счет спекания до 20 МПа, что явно недостаточно. Видно, что реактивный глинозем начинает участвовать в процессах спекания начиная с температуры 1200 °С (результаты для температур 800, 1000 и 1100 °С в табл. 2 не приведены, так как прироста прочности отмечено не было).

Наиболее высокая прочность после нагревания до 1200 °С (38 МПа) достигается при совместном использовании реактивного глинозема и ТПФН (см. табл. 2). По-видимому, это объясняется более ранним началом спекания под действием триполифосфата натрия. Пластификаторы, входящие в составы 5 и 6, заметно препятствуют раннему спеканию, прочность таких составов ниже примерно в 1,5 раза. Наиболее заметен эффект от введения добавки СП-1 в комплекс ТПФН + РГ – прочность после 1200, 1400 и 1500 °С ниже (см. табл. 2), чем у составов 4 (без суперпластификатора) и 6 (с поликарбоксилатным суперпластификатором). Поскольку плотность бетонной смеси для составов 4, 5 и 6 почти одинакова, как и расход воды, – пористость должна находиться также

на одинаковом уровне. То есть речь идет именно о препятствовании спеканию добавкой СП-1.

При использовании добавки Melfluxe 1641 F совместно с РГ и ТПФН прочность после обжига выше, чем при введении СП-1, но ниже, чем у комплекса РГ и ТПФН, в среднем на 20 %.

Таким образом, речь идет не о влиянии конкретно СП-1, а об общем влиянии органических добавок-суперпластификаторов на ухудшение процессов спекания в интервале температур 1200–1500 °С.

Температура деформации под нагрузкой разработанного низкоцементного бетона на основе ТПФН и РГ, ТПФН, СП-1 и РГ, ТПФН, РГ и Melfluxe 1641 F одинакова (табл. 3), так как определяется свойствами шамота и цементного камня. Однако термическая стойкость меняется в соответствии с изменениями остаточной прочности – наибольшие показатели термостойкости показали состав 6 и состав 4 (см. табл. 3). Следовательно, использование комплекса добавок ТПФН и РГ для получения на заполнителе из каолинового шамота низкоцементного бетона является наилучшим вариантом, позволяющим получить высокие показатели прочности при сжатии (48 МПа) и термической стойкости. Дальнейшее увеличение предела прочности при сжатии свыше 50 МПа представляется невозможным из-за недостаточно высоких прочностных свойств шамотного заполнителя.

Заключение

В результате проведенных исследований был разработан низкоцементный жаростойкий бетон на фракционированном каолиновом шамоте с температурой применения до 1500 °С. Изучено влияние добавок ТПФН, РГ и Melfluxe 1641 F на количество

воды затворения при получении равноподвижных самоуплотняющихся бетонных смесей. Показано, что наиболее эффективным является совместное использование ТПФН и РГ, ТПФН, РГ и суперпластификатора Melfluxe 1641 F. Установлено, что введение органических добавок-суперпластификаторов

негативно влияет на процессы спекания и зависит от вида добавки. Разработан шамотный низкоцементный бетон с высокими значениями предела прочности при сжатии после нагревания до 1500 °С (до 50 МПа) с термической стойкостью 20 водных теплосмен (марка Т₁₂₀ по ГОСТ 20910).

Список литературы

1. Семченко Г.Д. Неформованные огнеупоры: учебное пособие. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2007. 304 с.
2. Алексеева Н.В. Отечественный и зарубежный опыт производства и применения огнеупорных бетонов: моногр. СПб., 2008. 137 с.
3. Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Metallurgia, 1978. 370 с.
4. Огнеупорные бетоны / С.Р. Замятин, А.К. Пургин, Л.Б. Хорошавин [и др.]. М.: Metallurgia, 1982. 188 с.
5. Шнабель М., Бур А., Даттон Д. Реология огнеупорных бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками на основе глинозема и шпинели // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 119–126. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-3-119-126
6. Корундовый огнеупорный материал на глиноземистой связке, стойкий к высокотемпературным деформациям / П.М. Плетнев, В.Н. Погребенков, В.И. Верещагин, Д.С. Тюлькин // Новые огнеупоры. 2018. № 2. С. 47–52. DOI: 10.17073/1683-4518-2018-1-47-52
7. Соков В.Н. Создание огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов с повышенной термостойкостью: моногр. М., 2015. 276 с.
8. Properties of alumina based low-cement self flowing castable refractories / E. Karadeniz, C. Gurcan, S. Ozgen, S. Aydin // J. Eur. Ceram. Soc. 2007. Vol. 27. P. 1849–1853. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.050
9. Altun I. Effect of temperature on the mechanical properties of self-flowing low cement refractory concrete // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31. P. 1233–1237. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00533-6
10. Effect of particle size distribution and calcium aluminate cement on the rheological behaviour of all-alumina refractory castables / A.P. Silva, A.M. Segadães, D.G. Pinto, L.A. Oliveira, T.C. Devezas // Powder Technology. 2012. Vol. 226. P. 107–113. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.028
11. Улучшение свойств огнеупорных бетонов за счет модификации матрицы / М. Шнабель, А. Бур, Р. Кокегей-Лоренц и др. // Новые огнеупоры. 2015. № 3. С. 91–97. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-3-91-97
12. Кашеев И.Д., Поморцев С.А., Ряплова А.А. Разработка огнеупорных бетонов алюмосиликатного и глиноземистого составов для тепловых агрегатов черной металлургии // Новые огнеупоры. 2014. № 7. С. 15–18. DOI: 10.17073/1683-4518-2014-7-15-18
13. Okamura H., Ozawa K. Mix design for self-compacting concrete // Concrete Library of JSCE. 1995. № 25. P. 107–120. DOI: 10.1201/9781482271782
14. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete // J. of Advanced Concrete Tehnology. 2003. Vol. 1. P. 5–15. DOI: 10.3151/jact.1.5
15. Okamura H. Self-compacting high-performance concrete // Concrete International. 1997. Vol. 19, № 7. P. 50–54.
16. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting high-performance concrete // Progress in Structural Engineering and Materials. 1998. Vol. 1, № 4. P. 378–383. DOI:10.1002/PSE.2260010406
17. Zhou X., Sankaranarayanan K., Rigaud M. Design of bauxite-based low-cement pumpable castables: a rheological approach // Ceram. Int. 2004. Vol. 30, Issue 1. P. 47-55. DOI:10.1016/S0272-8842(03)00060-9
18. High-alumina refractory castables bonded with novel alumina-silica-based powdered binders / A.P. Luz, S.J.S. Lopes, D.T. Gomes, V.C. Pandolfelli // Ceram. Int. 2018. Vol. 44, Issue 8. P. 9159–9167. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.02.124
19. Designing particle sizing and packing for flowability and sintered mechanical strength / Abílio P. Silva, Deesy G. Pinto, Ana M. Segadães, Tessaleno C. Devezas // J. Eur. Ceram. Soc. 2010. Vol. 30. P. 2955–2962. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.12.017.
20. Влияние пирокатехина и других дефлокулянтов на свойства огнеупорных бетонов на коллоидном связующем / О.К. Некрасова, Е.А. Кузнецова, С.С. Павлов, М.Е. Воронков // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 50 (76). С. 33–37.
21. Влияние триполифосфата натрия на свойства низкоцементных бетонов / И.А. Вакуленко, В.В. Песчанская, Н.В. Шебанова, В.Г. Чистяков // Вестник НТУ «ХПИ». 2007. № 30. С. 58–61.

References

1. Semchenko G.D. *Neformovannyye ogneupory: uch. posobie* [Unformed refractories: textbook]. Kharkiv: Publishing house of NTU “KHPI”; 2007. 304 p. (in Russ.)
2. Alekseeva N.V. *Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt proizvodstva i primeneniya ogneupornykh betonov: monografiya*. [Domestic and foreign experience in the production and application of refractory concrete: monograph]. St. Petersburg, 2008. 137 p. (in Russ.)

3. Strel'ov K.K., Mamykin P.S. *Tekhnologiya ogneuporov* [Technology of refractories]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1978. 370 p. (in Russ.)
4. Zamyatin S.R., Purgin A.K., Khoroshavin L.B. et al. *Ogneupornye betony* [Refractory concretes]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 188 p. (in Russ.)
5. Schnabel M., Buhr A., Dutton J. Rheologie of high performance alumina and spinel castables. *Novye Ogneupory* [NEW REFRACTORIES]. 2017;(3):119–126. (In Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2017-3-119-126
6. Pletnev P.M., Pogrebenkov V.M., Vereshchagin V.I., Tyul'kin D.S. Alumina-bonded corundum refractory material resistant to the high-temperature deformations. *Novye Ogneupory* [New Refractories]. 2018;(2):47–52. (In Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2018-1-47-52
7. Sokov V.N. *Sozдание ogneupornykh betonov i teploizolyatsionnykh materialov s povyshennoy termostoystoykosti: monografiya*. [Creation of refractory concretes and thermal insulation materials with increased heat resistance: monograph]. Moscow, 2015. 276 p. (in Russ.)
8. Karadeniz E., Gurcan C., Ozgen S., Aydin S. Properties of alumina based low-cement self flowing castable refractories. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007;27:1849–1853. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.050
9. Altun I. Effect of temperature on the mechanical properties of self-flowing low cement refractory concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001;31:1233–1237. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00533-6
10. Silva A.P., Segadães A.M., Pinto D.G., Oliveira L.A., Devezas T.C. Effect of particle size distribution and calcium aluminate cement on the rheological behaviour of all-alumina refractory castables. *Powder Technology*. 2012;226:107–113. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.04.028
11. Schnabel M., Buhr A., Kockegey-Lorenz R., Dagmar S., Dutton J. Matrixdesign for better castables. *Novye Ogneupory* [New Refractories]. 2015;(3):91–97. (In Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2015-3-91-97
12. Kashcheev I.D., Pomortsev S.A., Ryaplova A.A. The development of alumina-silicate and alumina concretes for ferrous metallurgy thermal vessels. *Novye Ogneupory* [New Refractories]. 2014;(7):15–18. (In Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2014-7-15-18
13. Okamura H., Ozawa K. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*. 1995;25:107–120. DOI: 10.1201/9781482271782
14. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete. *J. of Advanced Concrete Tehnology*. 2003;1:5–15. DOI: 10.3151/jact.1.5
15. Okamura H. Self-compacting high-performance concrete. *Concrete International*. 1997;19(7)50–54.
16. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting high-performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1998;1(4):378–383. DOI: 10.1002/PSE.2260010406
17. Zhou X., Sankaranarayanan K., Rigaud M. Design of bauxite-based low-cement pumpable castables: a rheological approach. *Ceram. Int.* 2004;30(1):47–55. DOI: 10.1016/S0272-8842(03)00060-9
18. Luz A.P., Lopes S.J.S., Gomes D.T., Pandolfelli V.C. High-alumina refractory castables bonded with novel alumina-silica-based powdered binders. *Ceram. Int.* 2018;44(8):9159–9167. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.02.124
19. Silva A.P., Pinto D.G., Segadães A.M., Devezas T.C. Designing particle sizing and packing for flowability and sintered mechanical strength. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2010;30:2955–2962. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.12.017
20. Nekrasova O.K., Kuznetsova E.A., Pavlov S.S., Voronkov M.E. Effects of pyrocatechol and commercial deflocculants on colloidal binder refractory concrete. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2019;50(76):33–37. (in Russ.)
21. Vakulenko I.A., Peschanskaya V.V., Shebanova N.V., Chistyakov V.G. [The influence of sodium tripolyphosphate on the properties of low-cement concretes]. *Vestnik NTU «HPI»* [Bulletin of NTU “KHPI”]. 2007;30:58–61. (in Russ.)

Информация об авторах:

Абызов Виктор Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; abyzo@vva@susu.ru

Лещенко Игорь Евгеньевич, магистрант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, igor1024a@gmail.com

Information about the authors:

Viktor A. Abyzov, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, abyzo@vva@susu.ru

Igor E. Leshchenko, Master's Degree Student, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, igor1024a@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023.