

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19

^{1,*}Чернышева Н.В., ¹Борисов И.С., ²Сардарбекова Э.К., ¹Дребезгова М.Ю., ³Агеева М.С.¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,²Кыргызско-Российский славянский университет им. Б.Н. Ельцина³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОНКОМОЛОТОГО ШЛАКА НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты изменения свойств композиционного гипсового вяжущего с минеральной добавкой шлака при изменении его тонкости помола. Исследования заключались в измельчении шлака до разной удельной поверхности с последующим определением физических характеристик. В ходе исследований изучена кинетика измельчения, изменение удельной поверхности и кинетика тепловыделения тонкомолотого шлака при взаимодействии с водой. Выявлено его рациональное количество для обеспечения регулирования в рекомендуемых пределах концентрации СаО в гипсоцементной системе (по ТУ 21-31-62-89). Проанализированы кислотно-основные свойства тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью и установлено изменение концентрации активных адсорбционных центров на поверхности его частиц. В работе приведено сравнение физико-механических характеристик КГВ, выявлены особенности при введении минерального компонента с разной удельной поверхностью частиц. Установлено, что при помоле шлака происходит разрушение частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов в зоне сколов и выщербленных мест, с высокоразвитой поверхностью, что способствует проявлению химической активности в присутствии воды. На поверхности тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество центров в диапазоне с рКа от -4.4 до 7 (64,3 мг-экв/г), оказывающих влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита, что подтверждается результатами физико-механических свойств.

Ключевые слова: тонкомолотый шлак, удельная поверхность, активные центры, композиционное гипсовое вяжущее.

Введение. Последние годы композиционные гипсовые вяжущие и материалы на их основе относятся к материалам нового поколения, благодаря простоте, экономичности и малой энергоёмкости производства. Для повышения их эффективности и расширения области использования применяют минеральные наполнители, которые позволяют повысить эксплуатационные характеристики гипсовых материалов и способствуют интенсификации процесса их твердения [1–5].

В качестве минеральных компонентов при изготовлении композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) достаточно широко применяют техногенное сырьё, в частности, тонкомолотые металлургические шлаки, что позволяет решить экономические и экологические проблемы с повышением их технической эффективности, уменьшая негативное воздействие на окружающую среду, а также обеспечить управление структурой и свойствами гипсоцементных композитов [2, 3].

Дисперсность частиц компонентов композиционного гипсового вяжущего, включающего гипсовое вяжущее, портландцемент и тонкомолотую минеральную добавку, распределение их

по размерам, а также химический состав, оказывают значительное влияние на активность вяжущего, процессы его гидратации и структурообразования. Малый размер частиц и высокая удельная поверхность тонкомолотых минеральных добавок способствуют повышению их физико-химической активности и реакционной способности к химическому взаимодействию с известью [6–10] проявляющейся при гидратации цемента (в результате гидролиза C_3S). Благодаря снижению концентрации $Ca(OH)_2$ в твердеющей гипсоцементной системе образуются труднорастворимые гидратные соединения – низкоосновные гидросиликаты кальция типа $C-S-H(B)$ и другие новообразования, которые оказывают влияние на основные свойства КГВ и приближают его к портландцементу, повышая эксплуатационные характеристики – прочность, водостойкость и др. [11–14]. Учитывая рост цен на портландцемент и возможный дефицит его поставок, применение КГВ может стать своевременным решением в выборе материалов для широкого круга строительных конструкций, используя их не только в

тепло- и звукоизоляционных конструкциях полов, стен и внутренних перегородок, но и открывает перспективы их применения при возведении ограждающих конструкций малоэтажных зданий, создавая реальный вклад в реализацию национальной программы «Доступное и комфортное жилье».

Для создания КГВ с улучшенными физико-техническими и эксплуатационными характеристиками необходима разработка конкретных рецептур с учетом химических, минеральных и гранулометрических особенностей, применяемых тонкомолотых минеральных добавок. В связи с этим цель исследований заключалась в изучении характеристик минеральной добавки тонкомолотого шлака, его влияния на структурообразование и свойства композиционного гипсового вяжущего.

Материалы и методы. Для проведения испытаний были использованы следующие сырьевые материалы: гипсовое вяжущее марки Г-6 Б II ЗАО «Самарский гипсовый комбинат», удовлетворяющий требованиям ГОСТ 125-2018; бездобавочный портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ), ОАО «Евроцемент», ГОСТ 31108-2016; тонкомолотый Череповецкий доменный шлак ПАО «Северсталь» (г. Череповец, РФ).

Химический состав доменного шлака: CaO – 37,41...39,1 %, SiO_2 – 37,28...39,7 %, Al_2O_3 – 8,7...9,7 %, MgO – 11,8...12,3%, FeO – 0,33...0,52, S-0,55...0,89 %, TiO_2 – 0,46...1,36%, K_2O – 0,52 %, Na_2O – 0,67. Модуль основности шлака, определенный по формуле $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$, составил 1,3, т.е. шлак можно отнести к основным (модуль ≥ 1).

Для определения состава сырьевых и синтезированных материалов применялся комплекс аналитических методов: РФА, РЭМ и др. Физико-механические и химические показатели материалов оценивали по стандартным методикам.

Удельную поверхность и среднемассовый размер частиц тонкомолотого шлака согласно ГОСТ 310.2-81 определяли с помощью прибора дисперсионного анализа ПСХ-10а, работающего по принципу воздухопроницаемости слоя уплотнённого материала.

Гранулометрический состав дисперсных составляющих тонкомолотого шлака определяли при помощи метода лазерной гранулометрии на установке MicroSizer 201, позволяющей исследовать частицы размерами от 0,2 до 600 мкм, разбивая указанный диапазон частиц на 40 фракций, и определять размеры частиц и их процентное содержание в материале.

Качественную оценку фазового состава тонкомолотого шлака проводили с помощью рентге-

нофазового анализа на рентгено-флуоресцентном спектрометре ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Анализ рентгенограмм проводили методом порошковых дифрактограмм. Исследование микроструктуры и морфологии поверхности частиц тонкомолотого шлака проводили с помощью программно-аппаратного комплекса, включающего высокоразрешающий растровый электронный микроскоп (РЭМ) Tescan MIRA 3, совмещенный с персональным компьютером. Определение скорости начального тепловыделения тонкомолотого шлака при взаимодействии с водой проводили с помощью дифференциального калориметра ToniCAL Trio. Кислотно-основные характеристики поверхности тонкомолотого шлака оценивали по характеру распределения кислотных и основных центров адсорбции Льюисовского и Бренстедовского типов на его поверхности. Данная методика основана на адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде. Это приводит к изменению окраски индикаторов, что, в свою очередь, позволяет определить величину кислотности (основности) поверхности. Оптическую плотность растворов для количественного определения центров адсорбции измеряли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовых и видимых областях спектра с помощью спектрофотометра LEKI SSI207.

Основная часть. Эффективность введения минерального компонента тем выше, чем выше его поверхностная энергия [15–18]. Шлаку присуща меньшая активность, чем клинкеру, поэтому его нужно измельчать более тонко, чтобы он имел возможность полностью проявить свои гидравлические свойства. Для создания достаточно высокой плотности гипсоцементного камня зерновой состав вводимых в состав КГВ модифицирующих минеральных компонентов должен включать зерна различных размеров.

В работе был изучен гранулометрический состав Череповецкого доменного шлака, измельченного в лабораторной шаровой мельнице до удельных поверхностей 300 м²/кг, 450 м²/кг и 600 м²/кг, определенных с помощью прибора ПСХ-10а (рис.1).

В результате исследований по данным лазерной гранулометрии было выявлено, что исследуемые порошки Череповецкого доменного шлака, измельченного до разной удельной поверхности, имеют довольно широкий диапазон распределения частиц:

– у шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг размер частиц находится в диапазоне от 3,5 до 68 мкм; 90 % составляют фракции частиц в области 33,96 мкм, 50 % – в области 10,23 мкм,

и 10 % – в области 1,19 мкм; средний размер частиц – 14,5 мкм;

– у шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг размер частиц находится в диапазоне от 2 до 31 мкм; 90 % составляют фракции частиц в области 19,08 мкм, 50 % – в области 5,53 мкм и 10 % – в области 0,82 мкм; средний размер части – 8 мкм;

– у шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг размер частиц находится в диапазоне от 1,5 до 27 мкм; 90% составляют фракции частиц в области 16,31 мкм, 50 % – в области 4,03 мкм, и 10% – в области 0,7 мкм; средний размер части – 6 мкм.

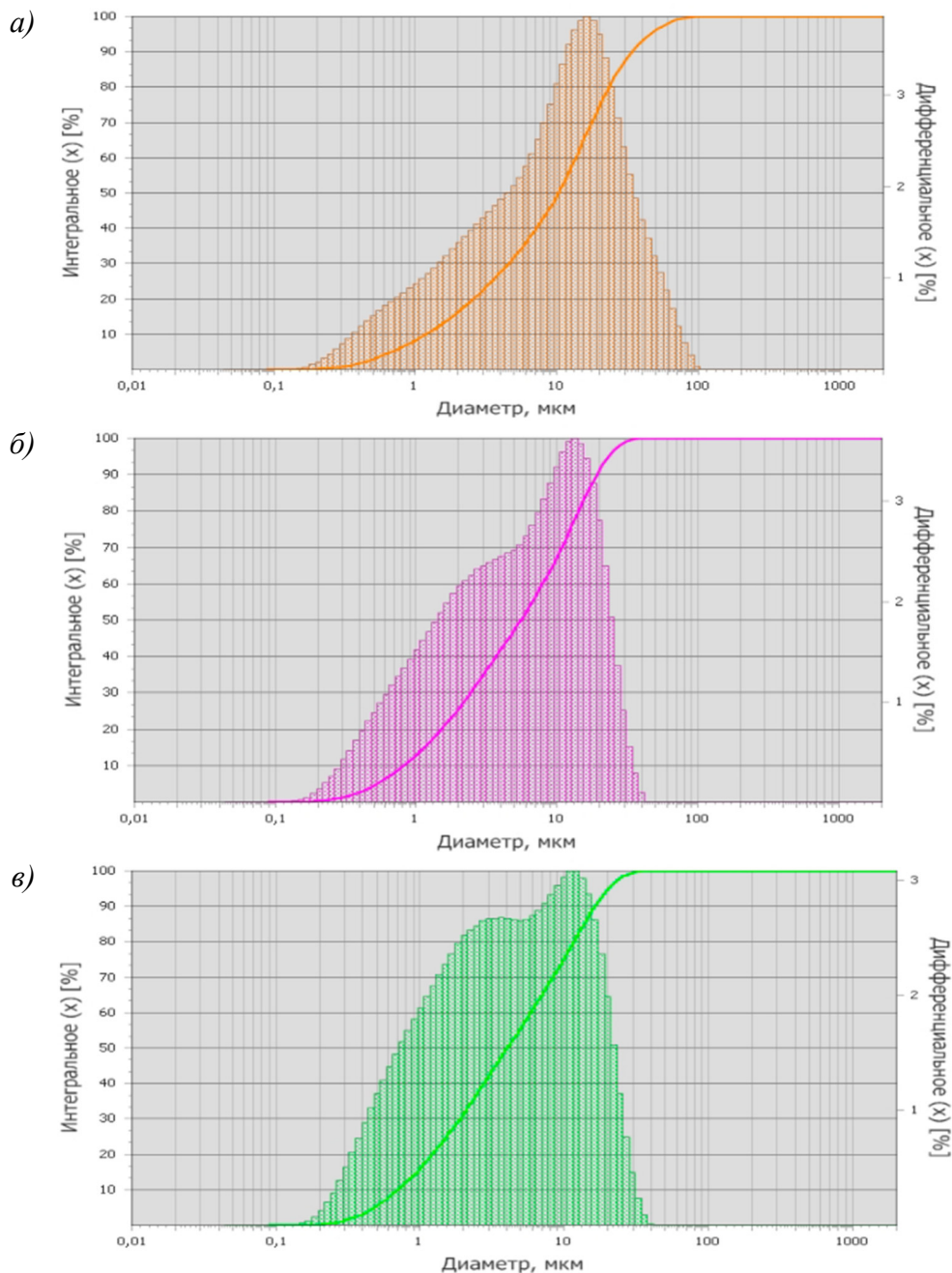


Рис. 1. Гранулометрический состав тонкодисперсного шлака с удельной поверхностью:
а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг и в – 600 м²/кг

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры и морфологии частиц тонкомолотого шлака разной удельной поверхности показали, что при помоле шлака происходит разрушение частиц с увеличением доли мелкой фракции зерен изометричной формы с высоко-

развитой поверхностью и возрастанием концентрации поверхностных дефектов, обусловленным нарушением контактов между кристаллами с разрывом кремнекислородных валентных связей в зоне сколов и выщербленных мест (рис. 2).

Увеличение удельной поверхности минеральных добавок, как правило, способствует росту их реакционной способности, о чем свидетельствуют результаты исследования скорости

их начального тепловыделения при взаимодействии с водой и концентрации активных адсорбционных центров на поверхности частиц.

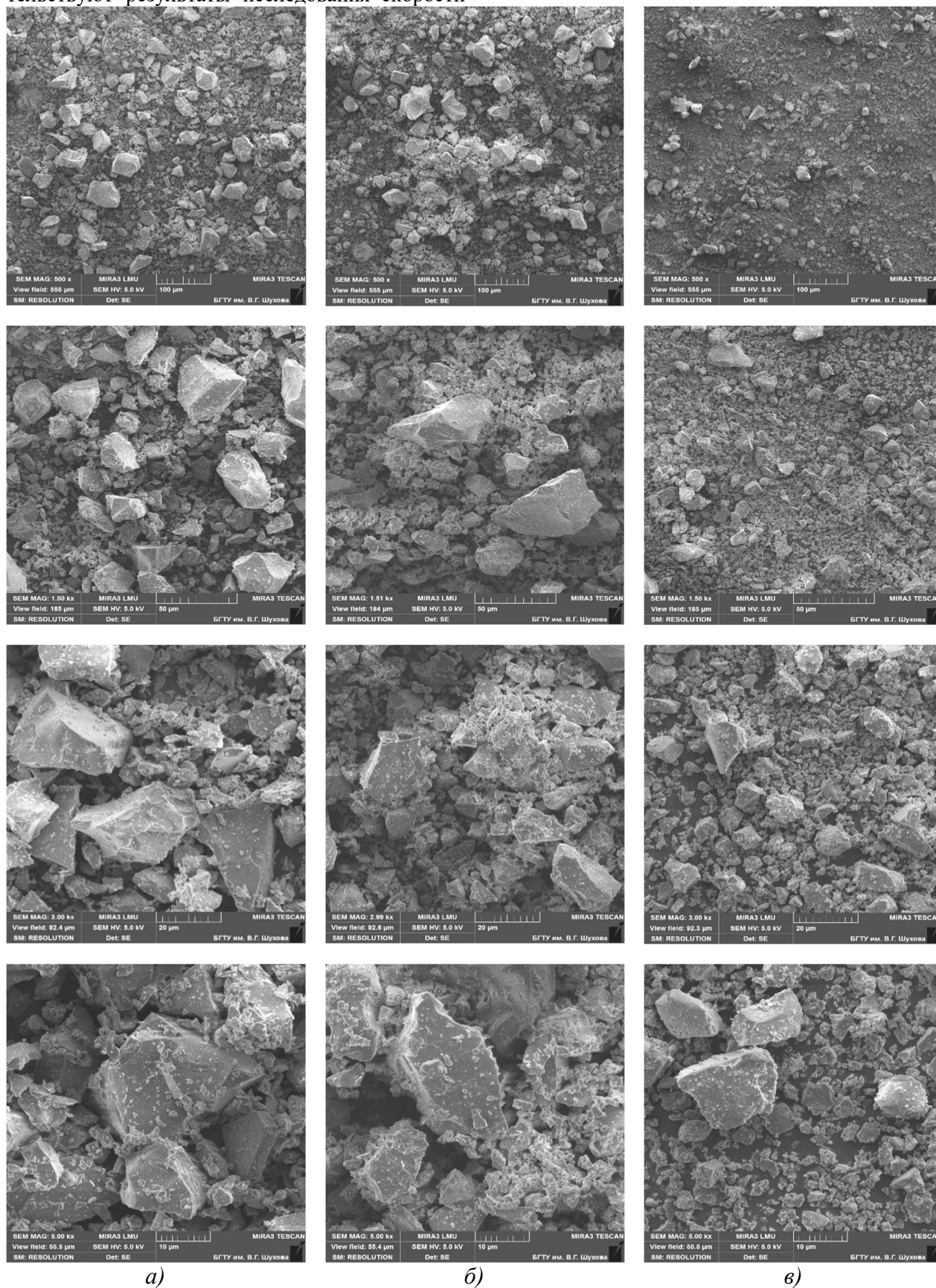


Рис. 2. Микроструктура и морфология частиц тонкомолотого шлака с удельной поверхностью: а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

С использованием дифференциального калориметра были исследованы особенности скорости начального тепловыделения при взаимо-

действии тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью с водой (до 24 часов, а также по общему количеству выделившегося тепла в течение 72 часов), (табл.1, рис.3).

Таблица 1

Характеристики термокинетических показателей

№ п/п	S _{уд} шлака, м ² /кг	Начало реакции, с	Экзоэффект			Тепловыделение макс. за 72 ч, Дж/г
			Момент достижения	Величина максимума Дж/г.ч	Тепловыделение, Дж/г	
1	300	25	45 с	4,8	1,76	1.76
2	450	36	1 мин 09 с	7,68	3.40	3.4
3	600	28	48 с	11,94	6,33	6.33

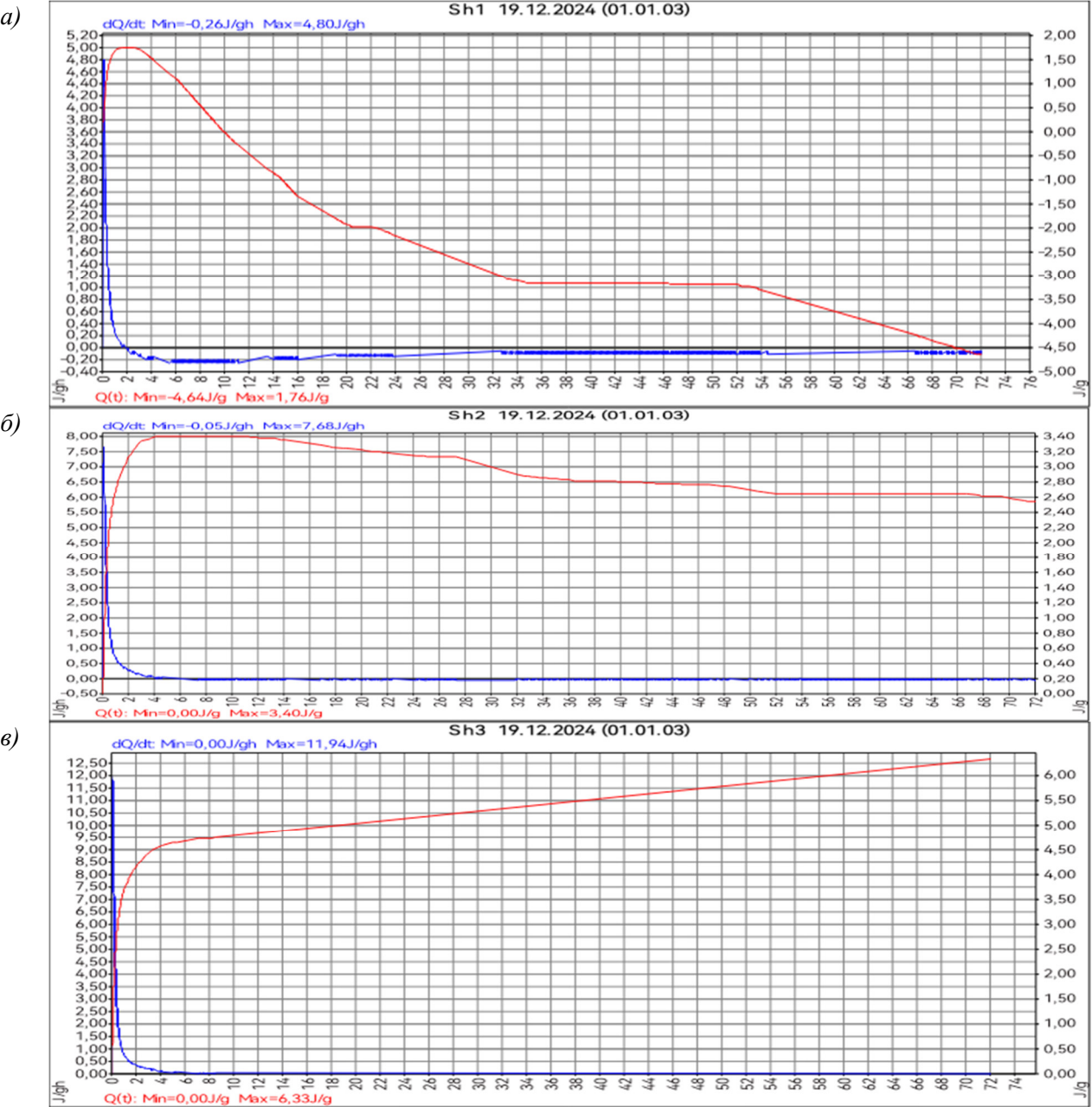


Рис. 3. Кинетика тепловыделения после контакта с водой тонкомолотого шлака с удельной поверхностью: а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

Опытным путем было установлено: – после контакта с водой наибольшее значение скорости тепловыделения (4,73 Дж/г·ч) было

выявлено у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг (в 1,36 и в 2,6 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (3,4 Дж/г·ч) и 300 м²/кг (1,76 Дж/г·ч), соответственно, что свидетельствует о его более высокой реакционной активности;

– нулевой уровень тепловыделения тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг установился через 7 ч 8 мин и сохранялся на уровне 4,73 Дж/г·ч вплоть до 72 ч, что свидетельствует о продолжающейся реакционной активности добавки, связанной, видимо, с микро-трещиноватостью и дефектностью кристаллической структуры;

– нулевой уровень тепловыделения тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг был установлен через 4 ч 8 мин,

– при дальнейшем уменьшении удельной поверхности тонкомолотого шлака до 300 м²/кг нулевой уровень тепловыделения был установлен через 1 ч 40 мин, что связано со снижением его реакционной активности.

Но, реакционная активность тонкомолотых шлаков не может быть связана только с повышением удельной поверхности (уменьшением размера частиц) [19–22]. Поэтому было исследовано изменение концентрации активных адсорбционных центров на их поверхности с помощью индикаторного метода фиксации распределения центров адсорбции (РЦА) в спектрофотометрическом варианте, который позволяет характеризовать наличие активных центров определенного типа по показателю кислотности рКа и оценить их содержание (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2

Концентрация активных центров на поверхности тонкомолотого шлака

Удельная поверхность, м ² /кг	рКа		
	-4,4...0	0...7	7...12,8
	Сумма оснований по Льюису, мг-экв/г	Сумма кислот по Бренстеду, мг-экв/г	Сумма оснований по Бренстеду, мг-экв/г
300	16,268	39,219	218,762
450	14,667	49,644	180,335
600	24,684	30,079	128,834

Результаты исследований свидетельствуют о наличии большого количества адсорбционных центров на поверхности тонкодисперсных шлаков с разной удельной поверхностью в области рКа -1...1; 1,3...5 и 6,5...8,8; 10,5...12,8, причем отличается как количество центров различных типов, так и суммарное содержание (табл. 3, рис. 4).

Согласно [22] наполнители, имеющие центры достаточной интенсивности в областях с рКа от -4,4 до 7 и больше 12,8, способны каталитически активировать гидратацию вяжущего. По содержанию активных центров в области от 7 до 12,8 можно судить о гидрофильности поверхности твердого вещества.

Наиболее высокое содержание Бренстедовских основных активных центров адсорбции в области рКа 7...13 (218,762 мг-экв/г) у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг, повышающих гидрофильность его поверхности, будет способствовать уменьшению нормальной густоты гипсоцементного теста за счет пластифицирующего эффекта (рис. 4, а).

У тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (рис. 4, б) выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество

центров в диапазоне с рКа от -4,4 до 7 (64,3 мг-экв/г), что оказывает влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита.

Несмотря на наличие большого количества (24,684 мг-экв/г) Льюисовских основных активных центров в области рКа -1...1 у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг (по сравнению с более грубодисперсным материалом), это не приводит к повышению прочности композита с его использованием, т.к. суммарное содержание активных центров в диапазоне -4,4...7 ниже, чем в 2-х других случаях (рис. 4, в).

Таким образом, повышение реакционной способности тонкомолотого шлака, связанное с увеличением его удельной поверхности, широким диапазоном распределения частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов (активных центров) и высокоразвитой поверхностью положительно отразится на свойствах затвердевшего КГВ.

С целью подтверждения сделанных выводов были определены показатели, моделирующие условия контакта и процессы между минеральной добавкой тонкомолотого шлака и гипсоцементной матрицей. Было исследовано влияние удельной поверхности тонкомолотого шлака на

физико-механические свойства КГВ. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Установлено, что с увеличением удельной поверхности тонкомолотого шлака в составе КГВ с 300 до 450 м²/кг при одинаковом водо-вяжущем отношении гипсоцементной смеси ($B/V_{\text{яж}}=0,55$)

раскрывается гидравлический потенциал шлака, и наблюдается увеличение предела прочности при сжатии затвердевших образцов: через 2 часа – с 2,64 до 2,83 МПа, через 7 суток – с 6,40 до 10,51 МПа, в 28 суток – с 13,00 до 15,00 МПа.

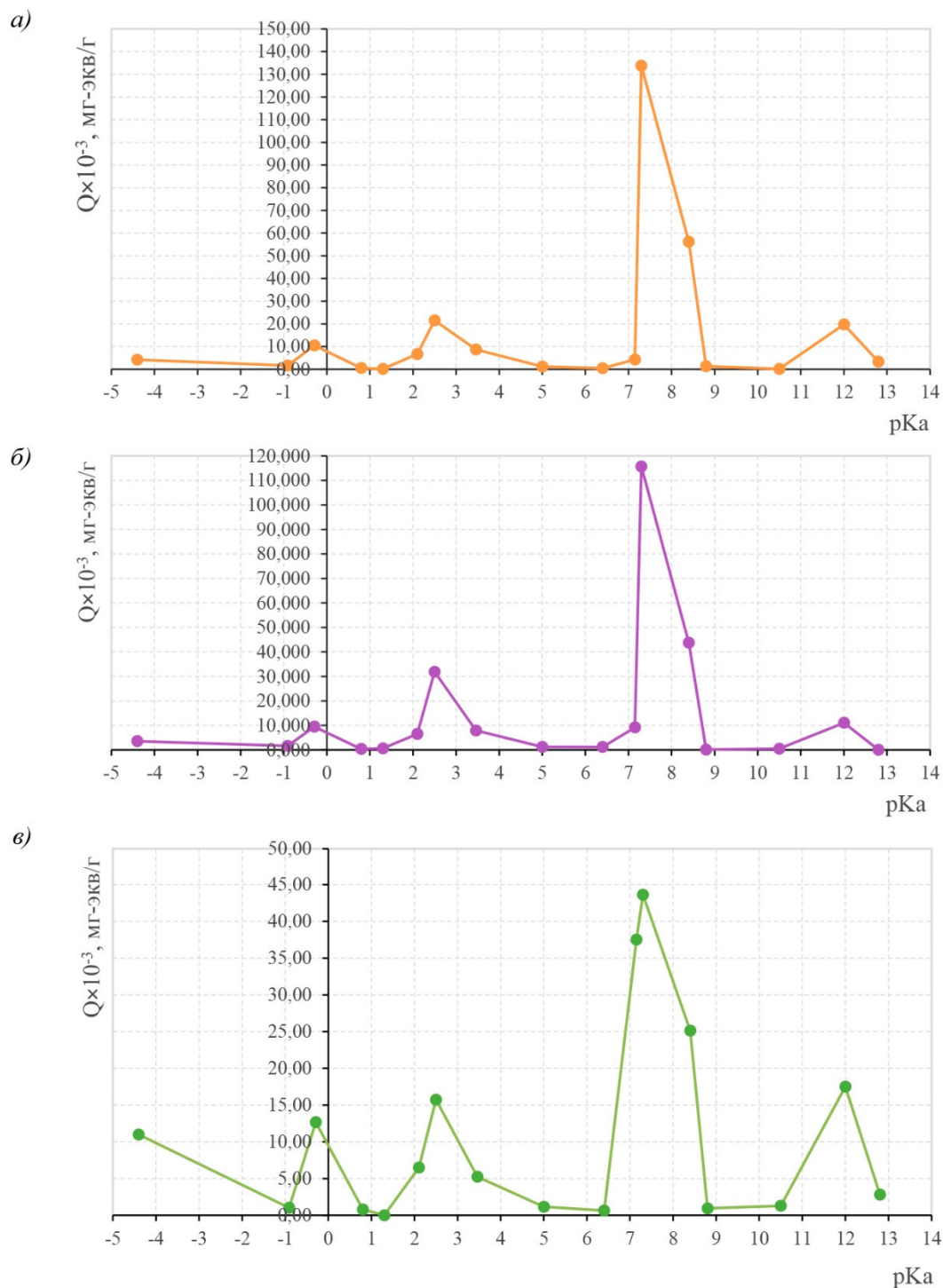


Рис. 4. Концентрация активных центров на поверхности тонкомолотого шлака с разной удельной поверхностью: а – 300 м²/кг; б – 450 м²/кг; в – 600 м²/кг

При дальнейшем повышении удельной поверхности тонкомолотого шлака до 600 м²/кг выявлено уменьшение предела прочности при сжатии затвердевшего вяжущего: через 2 часа – до

2,72 МПа, в возрасте 7 суток – до 10,51 МПа, а в возрасте в 28 суток – до 13,40 МПа, но данный параметр остается выше, чем с удельной поверхностью шлака 300 м²/кг. Это, видимо, связано с

меньшим суммарным содержанием активных центров на поверхности частиц тонкомолотого шлака в области рКа – 4.4...7, а также с приростом удельной поверхности при смешивании,

совмещенном с кратковременным домолом компонентов КГВ, и уменьшением крупных включений. Происходит вторичное агрегирование тонкодисперсных частиц и, как следствие, снижение прочностных характеристик.

Таблица 3

Физико-механические свойства КГВ с минеральной добавкой тонкомолотого шлака

№ п/п	S _{уд} , м ² /кг	В/Вяз	Расплав, мм	Сроки схватывания, мин, с		Сроки испытаний	R сж, МПа
				начало мин:сек	конец мин:сек		
1	300	0,55	230	6:30	7:30	2 ч	2,64
2						7 сут	6,40
3						28 сут	13,00
4		0,43	120	6:00	7:30	2 ч	5,30
5						7 сут	13,64
6						28 сут	16,26
7	450	0,55	220	6:00	7:00	2 ч	2,83
8						7 сут	10,51
9						28 сут	15,00
10	600	0,55	215	5:40	6:40	2 ч	2,72
11						7 сут	8,84
12						28 сут	13,40

Таким образом установлено, что в составе КГВ целесообразно использовать тонкомолотый шлак с рациональной удельной поверхностью 450 м²/кг, выше которой активность его поверхности возрастает менее интенсивно.

Выводы.

1) В результате помола шлака происходит разрушение частиц с увеличением мелкой фракции зерен изометричной формы с большим количеством структурных дефектов (активных центров) в зоне сколов и выщербленных мест, с высокоразвитой поверхностью, что способствует проявлению химической активности в присутствии воды.

2) Опытным путем установлено, что у тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 600 м²/кг после контакта с водой наблюдается наибольшее значение скорости тепловыделения – 4,73 Дж/г·ч, что в 1,36 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг (3,4 Дж/г·ч) и в 2,6 раза выше, чем у шлака с удельной поверхностью 300 м²/кг (1,76 Дж/г·ч), а нулевой уровень тепловыделения устанавливается через 7 ч 8 мин и сохраняется на уровне 4,73 Дж/г·ч вплоть до 72 ч, что можно объяснить более длительной реакционной активностью, обусловленной высоко-развитой поверхностью и наличием большего количества структурных дефектов (активных центров).

3) На поверхности тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг выявлено самое высокое содержание Бренстедовских активных центров по типу кислот в области рКа 0...7 (49,644 мг-экв/г), а также суммарное количество центров в диапазоне с рКа

от -4.4 до 7 (64,3 мг-экв/г), оказывающих влияние на гидратационную активность КГВ, повышая степень его гидратации и прочность затвердевшего композита, что подтверждается результатами физико-механических свойств.

4) Рациональным является использование в составе КГВ минеральной добавки тонкомолотого шлака с удельной поверхностью 450 м²/кг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. М.: Стройиздат, 1974. 238 с.

2. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высш.школа, 1980. 472 с.

3. Korovyakov V.F. Waterproof gypsum binders of the new generation // Сухие строительные смеси. 2017. No. 4. Рр. 17–19.

4. Князева С.А., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Жуков А.Н., Киршин И.А. Исследование структурообразования вяжущей системы на основе термически активированной керамзитовой пыли // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 21–29. DOI: 0.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29.

5. Liu J., Song G., Ge X., Liu B., Liu K., Tian Y., Wang X., Hu Z. Experimental study on the properties and hydration mechanism of gypsum-based composite cementitious materials // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. 314. DOI: 10.3390/buildings 14020314

6. Zhang F., Leong E.K.B., Yong C.L., Ghayeb H.H., Lee F.W., Mo K.H. Modification of gypsum

composite binder via introduction of ground granulated blast furnace slag and waterproofing agent // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20e03292. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03292

7. Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Агафонов Я.Е., Коваленко Е.В., Бурьянов А.Ф. Водостойкость, морозостойкость и водоотталкивающие свойства мелкозернистого бетона на композиционном гипсовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2025. № 1-2. С. 60–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-60-65.

8. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder // *Smart and Sustainable Built Environment*. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 702–710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

9. Yakovlev G., Gordina A., Ruzina N., Polyanskikh I., Pudov I., Shaybadullina A., Khozin V., Černý V. Gypsum compositions modified with metallurgical wastes // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 325 SSP. Pp. 104–109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.104.

10. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные гипсоцементно-пуццолановые бетоны для 3D-печати // *Строительные материалы*. 2024. № 1-2. С. 79–89. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-79-89.

11. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Sulman M. The Use of Aluminosilicate Ash Microspheres from Waste Ash and Slag Mixtures in Gypsum-Lime Compositions // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 12. 4213. DOI: 10.3390/ma16124213.

12. Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашева С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова* 2023. №4. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33.

13. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-Based Matrices for Sustainable Composite Materials: A Comprehensive Review // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2025. Vol. 77. No. 4. Pp. 2367–2382. DOI: 10.1007/s11837-025-07184-7.

14. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebzgov M.Y., Motorykin D.A. Rheological Properties of Molding Mixes on Composite Gypsum Binders for 3D-Additive Technologies of Low-Height Monolithic Construction // *Lecture Notes in*

Civil Engineering. 2021. Vol. 160 LNCE. Pp. 23–29. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_4.

15. Фролова М.А., Королёв Е.В. Энергетическая модель активации поверхности минеральных компонентов строительных композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2025. №1–2. С. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78.

16. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI: 10.1134/S2075113322010336.

17. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневецкая Я.Ю., Шейченко М.С. Механо-активация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 6. С. 85–89.

18. Leontev S.V., Taleiko A.A. The utilization of fluoroanhydrite for development of composite gypsum binders and dry construction mixtures for self-leveling floors // *Construction and Geotechnics*. 2025. Vol. 16. No. 2. С. 93–109. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.09.

19. Turgunbayeva J., Mirzaeva Z., Khakimova Y. Influence of binary filler of steelmaking slag and fly ash on properties of gypsum binder // *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3256. No. 1. 030036. DOI: 10.1063/5.0266889

20. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Пахомова О.К., Инькова Н.А. Исследование влияния ввода шлака при помоле клинкера на прочностные характеристики получаемого цемента в условиях АО «Себряковцемент» // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. № 2 (83). С. 46–52.

21. Ядыкина В.В. Влияние активных поверхностных центров кремнезем-содержащих минеральных компонентов на взаимодействие с битумом // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. №9 (537). С. 75–79.

22. Шангина Н.Н., Лейкин А.П. Распределение активных центров поверхности наполнителей как фактор, влияющий на физико-механические свойства бетона // *Прогрессивные ресурсосберегающие технологии в строительстве: Сборник научных трудов*. Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2002. С. 71–77.

Информация об авторах

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251 Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д.29 литера Б.

Борисов Иван Сергеевич, аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: ivan-borisov-2013@bk.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д.29 литера Б

Сардарбекова Эльмира Карагуловна, кандидат технических наук, доцент кафедры Строительство. E-mail: Elmira2501@mail.ru. Кыргызско-Российский Славянский университет имени первого президента РФ Б.Н. Ельцина, Кыргызстан, 720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия. 195251, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое ул. Политехническая, д. 29 литера Б.

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.09.2025 г.

© Чернышева Н.В., Борисов И.С., Дребезгова М.Ю., Агеева М.С., Сардарбекова Э.К., 2025

^{1,*}*Chernysheva N.V.*, ¹*Borisov I.S.*, ²*Sardarbekova E.K.*, ¹*Drebezgova M.Yu.*, ²*Ageeva M.S.*

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

²*Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin*

³*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FINE GROUND SLAG ON THE PROPERTIES OF COMPOSITE GYPSUM BINDING AGENT

Abstract. The article discusses the main aspects of changing the properties of a composite gypsum binder with a mineral slag additive when its fineness of grinding changes. The research consisted in grinding the slag to different specific surface area, followed by the determination of physical characteristics. In the course of the research, the kinetics of grinding, the change in specific surface area and the kinetics of heat release of finely ground slag during interaction with water were studied. Its rational amount has been revealed to ensure regulation within the recommended limits of CaO concentration in the gypsum cement system (according to TU 21-31-62-89). The acid-base properties of finely ground slag with different specific surface area are analyzed and a change in the concentration of active adsorption centers on the surface of its particles is established. The paper presents a comparison of the physico-mechanical characteristics of KGV, and reveals the features of the introduction of a mineral component with a different specific surface area of particles. It has been established that when slag is ground, particles are destroyed with an increase in the fine fraction of isometric grains with a large number of structural defects in the area of chips and gouges, with a highly developed surface, which contributes to the manifestation of chemical activity in the presence of water. The presence of adsorption centers on the surface of finely dispersed slags with different specific surface area in the area of the CR: 2...3.5; 7...9 and 10.5...13, increase their activity, contributing to an increase in the strength of KGV, which is confirmed by the results of physico-mechanical properties.

Keywords: finely ground slag, specific surface, active centers, composite gypsum binder

REFERENCES

1. Volzhensky A.V., Ferronskaya A.V. Gypsum binders and products [Gipsovye vyazhushchie i izdeliya]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 238 p. (rus)
2. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Chemical technology of binders [Himicheskaya

tekhnologiya vyazhushchih materialov]. Moscow: Higher.school, 1980. 472 p. (rus)

3. Korovyakov V.F. Waterproof gypsum binders of the new generation. Dry building mixes. 2017. No. 4. Pp. 17–19.

4. Knyazeva S.A., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Zhukov A.N., Kirshin I.A. Investigation of the

structure formation of a binder system based on thermally activated expanded clay dust [Issledovanie strukturoobrazovaniya vyazhushchej sistemy na osnove termicheski aktivirovannoj keramzitovoj pyli]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 21–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-21-29. (rus)

5. Liu J., Song G., Ge X., Liu B., Liu K., Tian Y., Wang X., Hu Z. Experimental study on the properties and hydration mechanism of gypsum-based composite cementitious materials. Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. 314.

6. Zhang F., Leong E.K.B., Yong C.L., Ghayeb H.H., Lee F.W., Mo K.H. Modification of gypsum composite binder via introduction of ground granulated blast furnace slag and waterproofing agent. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. e03292.

7. Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Agafonov Ya.E., Kovalenko E.V., Buryanov A.F. Water resistance, frost resistance and water-repellent properties of fine-grained concrete based on composite gypsum binder [Vodostojkost', morozostojkost' i vodoottalkivayushchie svoystva melkozernistogo betona na kompozicionnom gipsovom vyazhushchem]. Building materials. 2025. No. 1-2. Pp. 60–65. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-60-65. (rus)

8. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder. Smart and Sustainable Built Environment. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 702–710. DOI: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.

9. Yakovlev G., Gordina A., Ruzina N., Polyanskikh I., Pudov I., Shaybadullina A., Khozin V., Černý V. Gypsum compositions modified with metallurgical wastes. Solid State Phenomena. 2021. Vol. 325 SSP. Pp. 104–109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.325.104.

10. Mukhametrakhimov R.H., Rakhimov R.Z., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified gypsum-cement-pozzolan concretes for 3D printing [Modificirovannye gipsocementno-puccolanovye betony dlya 3D-pechati]. Building materials. 2024. No. 1-2. Pp. 79–89. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-79-89. (rus)

11. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Sulman M. The Use of Aluminosilicate Ash Microspheres from Waste Ash and Slag Mixtures in Gypsum-Lime Compositions. Materials. 2023. Vol. 16. No. 12. 4213. DOI: 10.3390/ma16124213.

12. Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic addi-

tives [Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozicionnyh gipsovyh vyazhushchih s kompleksom mineral'nyh i organicheskikh dobavok]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov 2023. No 4. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33. (rus)

13. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-Based Matrices for Sustainable Composite Materials: A Comprehensive Review. Journal of the Minerals Metals & Materials Society. 2025. Vol. 77. No. 4. Pp. 2367–2382. DOI: 10.1007/s11837-025-07184-7.

14. Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Motorykin D.A. Rheological Properties of Molding Mixes on Composite Gypsum Binders for 3D-Additive Technologies of Low-Height Monolithic Construction. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 160 LNCE. Pp. 23–29. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_4.

15. Frolova M.A., Korolev E.V. Energy model of surface activation of mineral components of building composite materials [Energeticheskaya model' aktivacii poverhnosti mineral'nyh komponentov stroitel'nyh kompozicionnyh materialov]. Building materials. 2025. No.1-2. Pp. 72–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-72-78. (rus)

16. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Aspects of Determining the Surface Activity of Dispersed Systems Based on Mineral Powders. Inorganic Materials: Applied Research. 2022. Vol. 13. No. 1. Pp. 194–199. DOI: 10.1134/S2075113322010336.

17. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Ya.Yu., Sheichenko M.S. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of various genesis in building materials science [Mekhanoaktivaciya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)

18. Leontev S.V., Taleiko A.A. The utilization of fluoroanhydrite for the development of composite gypsum binders and dry construction mixtures for self-leveling floors. Construction and Geotechnics. 2025. Vol. 16. No. 2. Pp. 93–109. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.09.

19. Turgunbayeva J., Mirzaeva Z., Khakimova Y. Influence of binary filler of steelmaking slag and fly ash on properties of gypsum binder. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2025. Vol. 3256. No. 1. 030036.

20. Krutilin A.A., Krapchetova T.V., Pakhomova O.K., Inkova N.A. Investigation of the effect of slag input during clinker grinding on the strength characteristics of the resulting cement in the

conditions of Sebyakovcement JSC [Issledovanie vliyaniya vvoda shlaka pri pomole klinkera na prochnostnye harakteristiki poluchaemogo cementa v usloviyah AO «Sebyakovcement»]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2021. No. 2 (83). Pp. 46–52. (rus)

21. Yadykina V.V. Influence of active surface centers of silica-containing mineral components on interaction with bitumen [Vliyanie aktivnykh poverhnostnykh centrov kremnezem-soderzhashchih min-

eral'nykh komponentov na vzaimodejstvie s bitumom]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Construction. 2003. No. 9 (537). Pp. 75–79. (rus)

22. Shangina N.N., Leikin A.P. The distribution of active centers of the filler surface as a factor affecting the physico-mechanical properties of concrete [Raspredelenie aktivnykh centrov poverhnosti napolnitelej kak faktor, vliyayushchij na fiziko-mekhanicheskie svoystva betona]. Progressive resource-saving technologies in construction: Collection of scientific papers. Saint Petersburg: St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 2002. Pp. 71–77. (rus)

Information about the authors

Chernysheva, Natalya V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal. territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politehnicheskaya St., 29, building B.

Borisov, Ivan S. Postgraduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction ivan-borisov-2013@bk.ru Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal. territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Politehnicheskaya St., Polytechnicheskaya, 29, building B

Sardarbekova, Elmira K. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction. E-mail: Elmira2501@mail.ru, Kyrgyz-Russian Slavic University named after the first President of the Russian Federation B.N. Yeltsin, Kyrgyzstan, 720000, Bishkek, Kyiv st., 44

Drebezgova, Maria Yu. Candidate of Technical Sciences, Higher School of Design and Architecture mdrebezgova@mail.ru Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251 St. Petersburg, internal territory of the city, Akademicheskoe municipal district, Polytechnicheskaya St., 29, building B.

Ageeva, Marina S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures. E-mail: ageevams@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 07.09.2025

Для цитирования:

Чернышева Н.В., Борисов И.С., Сардарбекова Э.К., Дребезгова М.Ю., Агеева М.С. Оценка влияния тонкомолотого шлака на свойства композиционного гипсового вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19

For citation:

Chernysheva N.V., Borisov I.S., Sardarbekova E.K., Drebezgova M.Yu., Ageeva M.S. Assessment of the influence of fine ground slag on the properties of composite gypsum binding agent. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19