СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-8-16

Ломакина Л.Н., *Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А.
Уфимский государственный нефтяной технический университет
**E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru*

ИССЛЕДОВАНИЯ ШЛАКА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СОСТАВОВ

Аннотация. *В статье рассмотрены основные аспекты применения шлака внепечной обработки стали в качестве активной минеральной добавки для создания ресурсосберегающих цементных составов. Применение данной технологии позволяет решить проблему утилизации техногенных отходов металлургии при одновременном снижении расхода портландцемента до 50 %. Изучен многокомпонентный фазовый состав шлака, зависящий от специфики металлургического производства. Проанализировано влияние активных (силикаты и алюминаты кальция, суммарно ~25,5 %) и инертных минеральных фаз на процессы структурообразования. Установлено, что, несмотря на наличие инертных компонентов и превышение содержания периклаза относительно норм ГОСТ, шлак проявляет гидравлическую и пуццоланическую активность. Эта активность обусловлена как присутствием клинкерных минералов, так и аморфной кремнекислородной составляющей (~13,5 %), вступающей в реакцию с портландитом. Показано, что инертные фазы (волластонит, мервинит) выполняют положительную роль микроармирующих элементов и субстрата для гидратации. В работе приведена оценка прочностных характеристик составов с различным содержанием шлака. Установлено, что частичная замена цемента (25 %) данным техногенным сырьем позволяет сохранить физико-механические показатели на уровне контрольного образца, а совместное введение модифицирующих добавок (пластификатора ПФМ-НЛК) способствует их повышению. Таким образом, подтверждена техническая возможность и эффективность использования шлака внепечной обработки для сокращения затрат на производство цементных композитов без ущерба для их эксплуатационных свойств.*

Ключевые слова: шлак внепечной обработки стали, реакционная способность шлака, активная минеральная добавка, отходы металлургического производства, гидратация, минералогический состав, рентгенофазовый анализ.

Введение. Шлак является побочным продуктом металлургического производства и может представлять собой ценный ресурс, который при дополнительной подготовке может быть использован в производстве строительных материалов. Это особенно актуально для регионов с высокой концентрацией металлургических предприятий.

Одним из перспективных направлений является создание композиционных вяжущих и бетонов на их основе. Шлаки, полученные от металлургического производства, подвергаются сепарации от железосодержащих соединений, имеют многокомпонентный состав, а по содержанию основных оксидов (CaO, SiO_2, Al_2O_3) схожи с клинкерными минералами портландцемента. Вовлечение шлака в производство цементных композитов решает сразу несколько задач: снижает нагрузку на окружающую среду, уменьшает объёмы отходов и открывает новые возможности для создания строительных материалов с улучшенными характеристиками. Известно, что на производство цемента для бетонов приходится до 8 % глобальных антропогенных выбросов углекислого газа [1].

Как любой отход металлургического производства металлургические шлаки имеют многокомпонентный состав, который зависит от типа изготавливаемого металла (черный или цветной), а также условий производства (используемого сырья, флюса, огнеупоров). В процессе высокотемпературной обработки металла происходит взаимодействие с кислородом различных элементов: железа, кремния, кальция, алюминия, магния и других элементов из сырья, топлива или флюсов. В результате образуются их оксиды, а при затвердевании шлак представляет собой стекловидное или камневидное вещество. Согласно ГОСТ Р 56592-2015, тонкомолотый шлак может обладать пуццоланическим или гидравлическим действием, от чего и зависит принцип его использования при добавлении в вяжущее.

При создании композиционного вяжущего со шлаком в качестве минеральной добавки очищенный от железосодержащих соединений шлак размалывают до удельной поверхности 4000–4500 см^2/г и менее, хотя существуют примеры использования несепарированных шлаков. Авторы работ [2,3] считают, что введение мартеновского шлака в количестве 5–15 % может заменить такое

же количество цемента с сохранением основных свойств бетона.

Авторы [1] исследовали гидратацию цементов со шлаком, имеющим в составе до 70 мас. % оксидов железа (в пересчете на Fe_2O_3), и доказали их реакционную способность. Авторы отмечают, что в раннем возрасте прочность на сжатие образцов со шлаком заметно снижалась по сравнению с контрольными, однако после 28 суток твердения показатели прочности заметно выросли и превысили прочность контрольных образцов, что дало основание считать, что шлак имеет отсроченный эффект положительного действия на набор прочности цементно-шлаковых составов. Исследуемый шлак был получен в процессе производства в доменной печи цветных металлов, далее был подвержен последующей высокотемпературной обработке и закалён путём гранулирования в воде.

Авторы [4] также отмечают, что введение в цементные бетоны тонкомолотого доменного гранулированного шлака в количестве до 30% дает некоторое снижение прочности в первые 1-7 суток. Однако к 28 суткам темп набора прочности составов со шлаком существенно растет по сравнению с равномерным темпом набора прочности контрольных составов.

Цемент, смешанный со сталеплавильным шлаком, демонстрирует иное экзотермическое поведение по сравнению с цементом, смешанным с золой-уноса или доменным шлаком. Сталеплавильный шлак всегда характеризуется более низким тепловыделением в раннем возрасте. Авторы [5] отмечают снижение выделение тепла при гидратации C_3S цемента, смешанного со стальным шлаком, в течение первых суток примерно на 40 %. Стальной шлак значительно замедляет раннюю гидратацию цемента, влияя на осаждение портландита (CH) и C-S-H, а не менее важную роль в замедлении ранней гидратации цемента играет майенит $C_{12}A_7$, которого, как правило, не мало в стальном шлаке. Количественная оценка взаимодействия поведения цемента и стального шлака при совместной гидратации достаточно сложна и не полностью изучена. Экзотермические расчёты на основе изменений фазового состава цемента со шлаком во времени – эффективный метод количественной оценки вклада компонентов цемента, смешанного со стальным шлаком, позволяющий установить взаимосвязь между экзотермическим поведением и процессом гидратации цемента, смешанного со стальным шлаком. Авторами [5] был предложен количественный метод оценки и прогнозирования экзотермического поведения цемента, смешанного со стальным шлаком, с использованием как количественных экспериментов, так и кинетического термодинамического моделирования.

Даже если на ранних сроках твердения шлак работает лишь как инертный наполнитель, следует рассмотреть возможность его активации на более поздних сроках твердения [6]. С целью исследования степени гидратации шлаков в зависимости от размера их частиц в цементных составах в более позднем возрасте авторы работы [6] исследовали химический состав частично и полностью гидратированных зерен доменного шлака в цементном бетоне возраста около 40 лет. Согласно результатам их исследований, не только мелкая фракция шлака (до 8 мкм) обладает хорошей гидратационной активностью, но и зерна среднего размера (8–17 мкм) обладают большим потенциалом. Авторы работы [7] предлагают улучшить гидратационную активность стальных шлаков в позднем возрасте именно за счет увеличения крупности помола шлаков. Авторы считают, что сверхтонкие стальные шлаки обладают более высокой гидратационной активностью, но препятствуют гидратации цемента. Установлено, что для известняка, золы-уноса и стеклобоя гидратационная активность растёт с уменьшением размера частиц. Для сталеплавильного шлака эта зависимость нелинейна: при увеличении удельной поверхности с 475 до 768 м^2/кг индекс активности за 28 суток возрастает с 45 % до 80 %, однако сверхтонкий помол усиливает торможение гидратации цемента [8]. Цементный раствор, смешанный с более мелким стальным шлаком, дольше схватывается, выделяет меньше тепла при гидратации и имеет более низкую прочность на сжатие в 3 суток. Таким образом, активность стального шлака при гидратации не увеличивается линейно с уменьшением его размера. Более тонкодисперсный сталеплавильный шлак выделяет больше тепла и имеет более высокую степень гидратации. Однако в композитных цементных растворах из цемента и сталеплавильного шлака сталеплавильный шлак препятствует гидратации цемента, и это препятствие усиливается с увеличением дисперсности.

Авторы [9] исследовали активность белитовых фаз γ-C_2S и β-C_2S сталеплавильных шлаков в автоклавных условиях. Белитовые фазы в сталеплавильном шлаке занимают основную часть, по сравнению с остальными фазами, поэтому, несомненно, вызывают интерес с точки зрения их полезного применения. Если модификация β-C_2S гидравлически активна в более поздние сроки твердения, то γ-C_2S практически инертна [10]. Воздействие среды водяного насыщенного пара высокого давления на гидратацию β-C_2S

усиливается присутствием щелочной среды, а на гидратацию γ-C_2S – кислой среды. Поэтому для ускорения гидратации более инертной фазы γ-C_2S шлака предлагается повысить концентрацию SiO_2 в жидкой фазе за счет увеличения времени и температуры автоклавной обработки цементных составов.

Тепловлажностный способ использования шлаков был применен в исследованиях [11, 12]. Авторы [11] пропаривали мелкозернистый бетон с золошлаковой смесью в качестве добавки-заменителя части портландцемента (10 %) с добавлением суперпластификаторов нафталин-формальдегидного и поликарбоксилатного действия для сравнения их эффективности. Сталеплавильные шлаки были применены в качестве альтернативы традиционным материалам для изготовления силикатбетонов, представленным в работах [12].

Таким образом, в большинстве случае, шлаки, в том числе и сталеплавильные, применяют при условиях повышенных температур, отличных от нормальных условий. Целью настоящего исследования является изучение шлака внепечной обработки стали в качестве минеральной добавки в портландцементных составах при нормальных условиях твердения.

Материалы и методы. Шлаки металлургического производства являются продуктами окисления исходных материалов. На химический состав шлаков влияет как процесс металлургического производства, так и тип сырья, и состав выплавляемого металла [13]. Объектом исследований является продукт внепечной обработки сталеплавильного производства. Шлак для исследований был практически полностью отделен от железистых включений, среднее содержание остатка составило не более 1 % (табл. 1). После помола шлак представлял собой измельченную смесь светло-серого цвета (рисунок 1). Шлак был разделен на две партии по продолжительности помола, который составил 4 и 9 часов. Удельная поверхность частиц шлака составила 3752 $см^2/г$ после 4 часов помола и 3898 $см^2/г$ после 9 часов помола (ниже типичного для активных минеральных добавок диапазона 4000–4500 $см^2/г$, что учтено при анализе активности).



а б

Рис. 1. Внешний вид помолотого шлака, просеянного через сито:
а) длительность помола – 4 ч., б) длительность помола – 9 ч.

С целью исследования минералогического состава проведен рентгенофазовый анализ проб. Среднее содержание фаз в пробах по данным РФА представлено в табл. 1. Здесь и далее в скобках указаны авторы структурных моделей по базе ICDD.

Трехкальциевая форма силиката C_3S представлена в виде трех полиморфных структур: триклинной, моноклинной и ромбоэдрической в общем количестве 10,28 %. Эти структуры возникают в результате последовательных и обратимых высокотемпературных фазовых переходов в последовательности, начиная от триклинной, затем моноклинной, заканчивая ромбоэдрической [10]. Именно они дают начальную прочность при гидратации вяжущего.

Что касается двухкальциевой формы силиката кальция C_2S, то она представлена в виде α, β и γ структур в общем количестве 45,4%. Однако, высокотемпературная форма α-C_2S представлена в виде «следов» – около 1%, с точки зрения гидратации не представляет интереса. Скорее всего, это форма β + α, расположенная в пределах β-C_2S [7]. Общее содержание β-C_2S составило, в среднем, 13,26 %, что дает уверенность в проявлении вяжущих свойств в более позднем возрасте. Активность сталеплавильных шлаков, где основными минералами также являются β-C_2S и γ-C_2S, изучалась авторами работы [9], где авторы наблюдали ускоренное твердение составов в более поздние сроки за счет присутствия фазы β-C_2S. Фаза γ-C_2S составляет треть состава всего

шлака (31,18 %), считается инертной в естественных условиях, так как имеет очень стабильную кристаллическую структуру, которая совершенно не реагирует с водой [7]. Активность γ-C_2S авторы [9] рекомендуют увеличивать путем автоклавной обработки составов в кислой среде.

Таблица 1

Сводный минералогический анализ проб шлака (по данным РФА, мас.%)

№ п/п	Наименование и формула минерала	Среднее содержание фаз в пробах
1	C_3S моноклинный (NISHI)	2,885
2	C_3S триклинный (Golovastikov)	5,12
3	C_3S ромбоэдрический (NISHI)	2,275
4	C_2S альфа (MUMME)	0,96
5	C_2S бета (JOST)	9,75
6	C_2S бета (MUMME)	3,51
7	C_2S гамма (MUMME)	31,18
8	C_3A кубический	2,155
9	Волластонит 2M $Ca_3(Si_3O_9)$	4,37
10	$C_{12}A_7$Майенит	19,305
11	C_2AS Геленит	4,11
12	Мервинит $Ca_3Mg(SiO_4)_2$	2,5
13	Доломит	0,335
14	Периклаз	8,775
15	Микроклин $KAlSi_3O_8$	1,115
16	Альфа Fe	0,345
17	Селецид железа кубический	0,465
18	C_2F	0,85

Из алюминатных фаз представлены трехкальциевый алюминат C_3A кубический и майенит $C_{12}A_7$. Один из самых активных продуктов цемента – трехкальциевый алюминат, гидратирует с водой с образованием гидроалюминатов кальция, первоначально нестабильной гексагональной формы, далее превращаясь в стабильную кубическую. Однако его в шлаке чуть более 2 %, что несущественно сказывается на начальной прочности вяжущего. В присутствии гипса (в реальном цементе, содержащем гипс) может образовать более стабильный продукт – эттрингит. Майенита достаточно много – около 19 %, что играет важную роль в замедлении ранней гидратации цемента со стальным шлаком, так как замедляет осаждение портландита (CH) и C-S-H [5, 8, 11, 14].

Такие фазы как волластонит $Ca_3(Si_3O_9)$, геленит C_2AS и мервинит $Ca_3Mg(SiO_4)_2$ обнаружены в небольших количествах и при обычных температурах твердения бетона не обладают самостоятельной вяжущей активностью, снижая при этом, общую активность шлака. Однако, частицы волластонита, благодаря своей игольчатой кристаллической структуре, являются микроармирующим компонентом, уплотняя структуру бетона и препятствуя образованию микротрещин [15]. Кроме того, игольчатые частицы волластонита являются подложкой для образования гидратных соединений цемента, ускоряя, тем самым его набор прочности. мервинит, обладая очень низкой реакционной способностью, может частично растворяться в щелочной среде цемента, выделяя ионы, которые затем участвуют в общих процессах гидратации цемента, то есть способствуют образованию дополнительных продуктов гидратации вяжущего.

Содержание микроклина $KAlSi_3O_8$ составляет около 1 %, который, скорее всего, образовался в результате присутствия соединений калия (K_2O) от флюсов или шихты. Периклаз MgO в количестве 8,8 % может негативно влиять на гидратацию остальных имеющихся фаз, поэтому его содержание, согласно ГОСТ 31108-2020, должно быть не более 5 %. Доломит $MgCO_3$ является инертным веществом, поэтому в процессе гидратации не участвует, попадает в шлак в качестве флюса для шлакообразования и улучшения вязкости и температуры плавления шлака. Железо и силицид железа – остатки от магнитной сепарации железа железоотделителями исходного шлака. Гидратационная активность феррита кальция C_2F незначительна, повышается при модифицировании их структуры сульфат-ионом и ростом основности.

Основная часть. Анализ минералогического состава шлака показал, что шлак обладает гидравлической активностью, особенно, в более

позднем возрасте за счет присутствия достаточного количества двухсиликатной формы кальция β структуры.

Для приготовления составов применили цемент ЦЕМ II В-К (Ш-И) 42,5 Н производства «ХайдельбергЦемент» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан), песок Кулушевского месторождения Республики Башкортостан.

Для испытаний были подобраны цементно-песчаные составы:

- состав 1 (контрольный), не содержащий шлак;
- состав 2 содержал 100 % шлака (без цемента);
- состав 3 содержал 75 % цемента по массе и 25% шлака по массе;
- состав 4 – цемента 50 % и шлака 50 %;
- состав 5 – цемента 75 %, шлака 25 %, добавки 2,3 % от массы шлак+цемент;
- состав 6 – цемента 50 %, шлака 50 %, добавки 2,3 % от массы шлак+цемент.

Песок добавляли в соотношении 3:1 по сравнению с цементом.

Ввод пластификатора ПФМ-НЛК производства ГК «Полипласт» (Россия, г. Уфа) в составы 5 и 6 позволил снизить водоцементное отношение до 0,34–0,38 для получения необходимой удобоукладываемости.

Составы испытывались на прочность на сжатие и растяжение при изгибе в возрасте 3, 14 и 28 суток для контроля динамики изменения прочности в камере нормального твердения. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Прочностные характеристики составов

№ состава	Состав: Ц – цемент; П – песок; Ш – шлак; Д – добавка, % по массе	Прочность при изгибе МПа, в возрасте,			Прочность на сжатие МПа, в возрасте		
		3 суток	14 суток	28 суток	3 суток	14 суток	28 суток
1	Ц+П	5,06	5,39	6,35	33,9	41	42,2
2	Ш+П	1,52	2,18	2,60	7,7	9,05	9,5
3	Ш(25 %)+Ц(75 %)+П	4,80	5,04	5,32	27,03	40,6	41
4	Ш(50 %)+Ц(50 %)+П	3,66	5,02	4,92	22,8	28,54	29,7
5	Ш(25 %)+Ц(75 %)+Д+П	Не проводилось		5,67	Не проводилось		44,2
6	Ш(50 %)+Ц(50 %)+Д+П			5,1			32

Как видно из таблицы 2, наблюдается рост прочности образцов состава 2 с чистым шлаком во времени. В возрасте 28 суток прочность на сжатие составила 9,5 МПа. Испытания проводились по методике, аналогичной ГОСТ 30744. В соответствии с ГОСТ Р 56592-2015 (п. 5.1.4) реакционная способность активных минеральных добавок должна быть не менее 5 МПа. Таким образом, исследуемый шлак соответствует требованиям к активным минеральным добавкам, обладающим вяжущими свойствами.

При введении шлака в цементную смесь произошло резкое увеличение прочности составов по сравнению с бесцементным составом.

Для количественной оценки взаимодействия компонентов выполнен расчёт аддитивной прочности составов по правилу смеси:

Состав 3 (25% шлака): аддитивная прочность = 42,2 × 0,75 + 9,5 × 0,25 = 34,0 МПа; реальная прочность – 41,0 МПа (превышение на 20,6%).

Состав 4 (50% шлака): аддитивная прочность = 42,2 × 0,50 + 9,5 × 0,50 = 25,9 МПа; реальная прочность – 29,7 МПа (превышение на 14,7%).

Превышение реальной прочности над аддитивной подтверждает наличие синергетического эффекта, обусловленного активирующим действием цемента по отношению к аморфной кремнезёмистой составляющей шлака. Вероятно, цемент действует как щелочной активатор шлака, реагируя с присутствующими на поверхности зёрен шлака кремнекислородными частицами аморфной структуры, образуя дополнительные гидросиликаты кальция (C-S-H). По данным РФА степень кристалличности составила в среднем 86,5 %; оставшаяся часть, предположительно, имеет аморфную структуру кремнезёма пуццоланического характера. Из составов со шлаком наилучшую прочность имел состав с заменой 25 % цемента (состав 3) снижение прочности на сжатие составав 28 суток составило лишь на 3 %, на растяжение при изгибе – на 16%по сравнению с цементом. При увеличении количества шлака до половины вяжущего (состав 4) прочность состава существенно снижается (на сжатие – на 30 %, на растяжение при изгибе – на 22,5 %). Можно отметить, что по мере снижения количества шлака у составов снижение прочно-

сти на растяжение при изгибе происходит значительно медленнее, чем при сжатии. При введении в составы 5 и 6 добавки ПФМ-НЛК наблюдается прирост показателей прочности в 28 суток по сравнению с бездобавочными составами 3 и 4. В частности, состав с добавлением шлака 25 % имеет прирост в прочности на растяжение при изгибе на 6,6 % и на сжатие – на 2,6 %. Состав с добавлением шлака 50 % имеет прирост в прочности на растяжение при изгибе на 3,7 % и на сжатие – на 7,7 %.

Таким образом, результаты исследований показывают, что часть цемента возможно заменить шлаком внепечной обработки стали до 25 % по массе без особого ущерба по прочности в возрасте 28 суток. Для получения цементных составов меньшей прочности возможна экономия цемента и до 50 %.

Сводный минералогический анализ проб шлака показал его минералогический состав. Около 27 % фазового состава шлака представляет интерес с точки зрения его гидравлической активности. Однако фазовый состав по результатам РФА составляет лишь 86,5 %, оставшаяся часть имеет аморфную структуру, невидимую при РФА. Предположительно, рентгеноаморфная часть шлака (≈13,5 %) представлена преимущественно активным кремнезёмом пуццоланического типа, что объясняет резкий рост прочности при совместном помоле с портландцементом за счёт взаимодействия с портландитом. Прочность цементных составов при замене части цемента шлаком достигается как за счёт гидравлической природы шлака, так и за счёт его некоторого пуццоланического действия.

Выводы

1. Выполнен комплексный анализ минералогического состава шлака. Установлено, что исследуемый продукт содержит около 25,5 % гидравлически активных фаз (C_3S, β-C_2S, C_3A) и не менее 13,5 % рентгеноаморфной кремнезёмистой составляющей, что предопределяет возможность его использования в качестве компонента композиционных вяжущих.

2. Установлено, что оптимальной является замена 25 % портландцемента шлаком: прочность на сжатие снижается не более чем на 3 %, при изгибе – на 16 % относительно бездобавочного состава, что позволяет сохранить физико-механические показатели на уровне контрольных образцов.

3. Выявлен синергетический эффект при совместном присутствии портландцемента и шлака. Расчёт аддитивной прочности по правилу смеси показал превышение реальных значений над расчётными: для состава с 25 % шлака – на 20,6 %, для состава с 50 % шлака – на 14,7 %. Установлено, что цемент выступает активатором гидратации аморфной фазы шлака, инициируя образование дополнительных гидросиликатов кальция (C-S-H).

4. Установлена эффективность комплексного модифицирования шлакосодержащих составов пластификатором ПФМ-НЛК. Введение добавки в количестве 2,3 % от массы вяжущего обеспечивает повышение прочности на сжатие до 7,7 %, при изгибе – до 6,6 % при одновременном снижении водопотребности смесей.

5. Зафиксировано превышение нормативного содержания периклаза в составе шлака (8,8 % при норме не более 5 %), что требует дополнительной оценки коррозионной стойкости и долговечности материалов (в том числе ускоренными методами по ГОСТ Р ИСО 15686-1). Отмечено также, что присутствие волластонита игольчатой морфологии потенциально может оказывать положительное микроармирующее действие, способствуя повышению трещиностойкости цементного камня, однако данное влияние требует отдельных дополнительных исследований.

6. По совокупности результатов шлак внепечной обработки стали следует рассматривать как перспективное техногенное сырьё для производства ресурсосберегающих цементных композиций. Его применение обеспечивает сокращение расхода портландцемента до 25–50 % без критического снижения эксплуатационных характеристик, что отвечает принципам рационального природопользования и снижения антропогенной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hallet V., Pedersen M.Th., Lothenbach B., Winnefeld F., De Belie N., Pontikes Y. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624

2. Ахвердиева Т.А., Джафаров Р. Влияние тонкомолотых минеральных добавок на свойства бетона // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 73–76. DOI:10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76

3. Klyuev S. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D-printing // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. 127644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127644

4. Суровцев М.М., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А., Морева Ю.А. Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем // Строительные материалы. 2023. № 7. С. 43–48. DOI:10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48

5. Zhuang Sh., Wang Q., Luo T. A quantitative method to assess and predict the exothermic behavior of steel slag blended cement // Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 175. 107373. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107373

6. Zhang Yu., Çopuroğlu O. Role of the grain size on the hydration characteristics of slag in an aged field concrete // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. 106985. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106985

7. Pang L., Liao Sh., Wang D., An M. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. 104866. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104866

8. Yessenov M.K., Ramatullaeva L.I., Kolesnikov A.S., Ivakhniyuk G.K. Aspects of ecological modernization of technological equipment to reduce the level of dust from mining and processing production // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. No. 10. Pp. 136–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_10_0_136

9. Кудеярова Н.П., Бушуева Н.П., Старичкова Е.Д. Активность белитовых фаз сталеплавильных шлаков в автоклавных условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 106–111. DOI: 10.12737/article_59a93b12242ff2.20855442

10. Тейлор Х.Ф.В. Химия цемента / пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.

11. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Головин С.Н., Дудник А.В., Золотухина Н.В. Эффективность суперпластификаторов в мелкозернистом бетоне с золошлаковой смесью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 29–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38

12. Старостина Ю.Л., Лупандина Н.С., Воронина Ю.С., Старостина И.В. Глиношлаковые материалы автоклавного твердения на основе саморассыпающихся сталеплавильных шлаков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 170–174.

13. Евтушенко Д.А. Переработка отходов металлургического производства. Управление техносферой // Ижевск: Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева. 2023. Т. 6. Вып. 3. 451 с.

14. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 196 с.

15. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A. Increasing the performance of a fiber-reinforced concrete for protective facilities // Fibers. 2021. Vol. 9. No. 11. 64. DOI:10.3390/fib9110064

Информация об авторах

Ломакина Лилия Наилевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительные конструкции. E-mail: lomakinaln@mail.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Юлбердин Ринат Тавратович, аспирант кафедры строительные конструкции. E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Хазиева Адель Рамилевна, магистрант кафедры строительные конструкции. E-mail Adele.caramel@mail.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Клепинина Мария Александровна, магистрант кафедры строительные конструкции. E-mail: masaklepinina@gmail.com. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Поступила 19.01.2026 г.

© Ломакина Л.Н., Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А., 2026

Lomakina L.N., *Yulberdin R.T., Khazieva A.R, Klepinina M.A.

Ufa State Petroleum Technological University.

**E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru*

RESEARCH OF LADLE FURNACE STEEL SLAG AS AN ACTIVE MINERAL ADDITIVE FOR CEMENT COMPOSITIONS

Abstract. *The article considers the main aspects of using ladle furnace steel slag as an active mineral additive for creating resource-saving cement compositions. The application of this technology makes it possible to solve the problem of utilizing technogenic metallurgical waste while simultaneously reducing Portland*

cement consumption by up to 50 %. The multicomponent phase composition of the slag, which depends on the specific features of metallurgical production, has been studied. The influence of active (calcium silicates and aluminates, totaling ~25.5 %) and inert mineral phases on the structure formation processes has been analyzed. It has been found that, despite the presence of inert components and the excess periclase content relative to GOST standards, the slag exhibits hydraulic and pozzolanic activity. This activity is due both to the presence of clinker minerals and to the amorphous silica-containing fraction (~13.5 %), which reacts with portlandite. It has been shown that the inert phases (wollastonite, merwinite) play a positive role as micro-reinforcing elements and as a substrate for hydration. The paper presents an assessment of the strength characteristics of compositions with different slag contents. It has been established that partial replacement of cement (25 %) with this technogenic raw material makes it possible to maintain the physical and mechanical properties at the level of the control sample, while the combined introduction of modifying additives (PFM-NLK superplasticizer) contributes to their improvement. Thus, the technical feasibility and effectiveness of using ladle furnace slag to reduce the cost of producing cement composites without compromising their performance properties have been confirmed.

Keywords: *ladle furnace steel slag, reactivity of slag, active mineral additive, metallurgical waste, hydration, mineralogical composition, X-ray phase analysis.*

REFERENCES

1. Hallet V., Pedersen M.Th., Lothenbach B., Winnefeld F., De Belie N., Pontikes Y. Hydration of blended cement with high volume iron-rich slag from non-ferrous metallurgy. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. 106624. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106624

2. Akhverdieva T.A., Jafarov R. Influence of finely ground mineral additives on concrete properties [Vliyanie tonkomolotykh mineral'nykh dobavok na svoistva betona]. Construction Materials. 2019. No. 3. Pp. 73–76. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-768-3-73-76 (rus)

3. Klyuev S. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D-printing. Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. 127644. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127644

4. Surovtsev M.M., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A., Moreva Yu.A. The use of ground granulated blast-furnace slag in cement binder [Ispol'zovanie molotogo domennogo granulirovannogo shlaka v tsementnom viazhushchem]. Construction Materials. 2023. No. 7. Pp. 43–48. DOI:10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48 (rus)

5. Zhuang Sh., Wang Q., Luo T. A quantitative method to assess and predict the exothermic behavior of steel slag blended cement. Cement and Concrete Research. 2024. Vol. 175. 107373. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107373

6. Zhang Yu., Çopuroğlu O. Role of the grain size on the hydration characteristics of slag in an aged field concrete. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 162. 106985. DOI: 10.1016/ j.cemconres.2022.106985

7. Pang L., Liao Sh., Wang D., An M. Influence of steel slag fineness on the hydration of cement-steel slag composite pastes. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. 104866. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104866

8. Yessenov M.K., Ramatullaeva L.I., Kolesnikov A.S., Ivakhniyuk G.K. Aspects of ecological modernization of technological equipment to reduce the level of dust from mining and processing production. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. No. 10. Pp. 136–148. DOI:10.25018/0236_1493_2023_10_0_136

9. Kudeyarova N.P., Bushueva N.P., Starichkova E.D. Activity of belite phases of steelmaking slags in autoclave conditions]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 9. Pp. 106–111. DOI: 10.12737/article_59a93b12242ff2.20855442

10. Taylor H.F.W. Chemistry of Cement [Khimiia tsementa]. Moscow: Mir, 1996. 560 p. (rus)

11. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Golovin S.N., Dudnik A.V., Zolotukhina N.V. Efficiency of superplasticizers in fine-grained concrete with ash and slag mixture [Effektivnost' superplastifikatorov v melkozernistom betone s zolosh-lakovoi smes'iu]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 29–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-29-38 (rus)

12. Starostina Yu.L., Lupandina N.S., Voronina Yu.S., Starostina I.V. Clay-slag materials of autoclave hardening based on self-disintegrating steelmaking slags [Glino-shlakovye materialy avtoklavnogo tverdeniia na osnove samorassypaiushchikhsia stalep-lavil'nykh shlakov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 170–174. (rus)

13. Yevtushenko D.A. Processing of metallurgical production waste [Pererabotka otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva]. Technosphere Management. Izhevsk: Institute of Oil and Gas named after M.S. Gutseriev. 2023. Vol. 6. Issue 3. 451 p.

14. Valuev D.V., Gizatulin R.A. Technologies for processing metallurgical waste [Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2012. 196 p. (rus)

15. Fediuk R., Amran M., Klyuev S., Klyuev A. Increasing the performance of a fiber-reinforced concrete for protective facilities. Fibers. 2021. Vol. 9. No. 11. 64. DOI:10.3390/fib9110064.

Information about the author
Lomakina, Liliya N. PhD. E-mail: lomakinaln@mail.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Yulberdin, Runat T. Postgraduate student. E-mail: julberdin-rinat@yandex.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Khazieva, Adele R. Master's student. E-mail: Adele.caramel@mail.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Klepinina, Maria A. Master's student E-mail: masaklepinina@gmail.com. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1.

Received 19.01.2026

Для цитирования:
Ломакина Л.Н., Юлбердин Р.Т., Хазиева А.Р., Клепинина М.А. Исследования шлака внепечной обработки стали в качестве активной минеральной добавки для цементных составов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 9. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-8-16

For citation:
Lomakina L.N., Yulberdin R.T., Khazieva A.R, Klepinina M.A. Research of ladle furnace steel slag as an active mineral additive for cement compositions // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 9. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-9-8-16