

СВОЙСТВА И НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА

**И. В. Старостина, А. С. Лушников,
Ю. Л. Макридина, М. А. Писклов**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», Белгород, Россия

Ключевые слова: гипсовые вяжущие; железокремниевый флокулянт-коагулянт; кислотная модификация; модельная эмульсия; раствор серной кислоты; сульфат кальция; электро-сталеплавильный саморассыпающийся шлак; эффективность очистки.

Аннотация: Представлены результаты исследования влияния условий кислотной модификации саморассыпающегося электросталеплавильного шлака на минеральный состав получаемого продукта и возможные направления его использования. Показано, что в результате кислотной модификации электросталеплавильного шлака происходит выщелачивание основных оксидов с образованием кристаллов сульфата кальция различной степени обводнения и кремневой кислоты. Увеличение концентрации раствора кислоты от 6 до 17,5 Н приводит к уменьшению содержания $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и увеличению содержания безводного CaSO_4 в получаемом продукте.

Развитие металлургии как промышленности неразрывно связано с изменением экологической обстановки в зоне производства и жизни человека. Все предприятия металлургического комплекса можно условно разделить на две группы:

- горнодобывающее производство и обогатительные комбинаты;
- металлургическое производство.

На промышленных предприятиях в условиях горно-металлургического производства происходит образование различных видов отходов – газо-воздушных смесей, сточных вод и твердых промышленных отходов, каждый из которых оказывает влияние на окружающую среду.

Старостина Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии, e-mail: starostinairinav@yandex.ru; Лушников Артем Сергеевич – студент; Макридина Юлия Леонидовна – ассистент кафедры промышленной экологии; Писклов Михаил Анагольевич – студент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», Белгород, Россия.

Большая часть промышленных отходов металлургического производства приходится на металлургические шлаки, которые образуются при выплавке металла из пустых пород, флюсов, продуктов окисления расплава и футеровки печей. Отходы складированы на больших площадях, которые занимают тысячи гектаров земель, которые в большинстве случаев имеют сельскохозяйственное назначение. В них накоплено около 500 млн т шлаков и ежегодно прибавляется примерно 80 млн т.

Шлаки представляют собой многокомпонентную силикатную систему со сложным химическим и фазовым составом, зависящим от вида выплавляемого металла и особенностей металлургического процесса.

В зависимости от характера процесса и типа печей шлаки черной металлургии делятся на следующие виды: доменные; сталеплавильные (мартеновские, конвертерные, бессемеровские и томасовские, электроплавильные); производства ферросплавов; ваграночные. Наибольшим является выход доменных шлаков – на 1 т чугуна он составляет 0,6...0,7 т. При выплавке стали выход шлаков на 1 т значительно меньше и составляет, т: при мартеновском способе – 0,2...0,3; бессемеровском и томасовском – 0,1...0,2; при выплавке стали в электропечах – 0,1...0,04.

Из всего объема образующихся металлургических шлаков используется около 50 %, и то главным образом доменные гранулированные шлаки – до 75 % от выхода. Шлаки ферросплавного производства используются на 45 – 50 %, сталеплавильные шлаки перерабатываются только 10 – 15 %.

В качестве основных причин низкого уровня переработки и утилизации сталеплавильных и особенно электросталеплавильных шлаков можно выделить следующие: высокое содержание СаО в составе шлаков в связанном и свободном состояниях, низкая гидравлическая активность, наличие металлических включений (до 5 %), непостоянство химического и минералогического составов и неустойчивость структуры.

Анализ литературы показал [1 – 4], что исследованиям по переработке и утилизации сталеплавильных шлаков с получением новой продукции с высокими потребительскими свойствами уделяется большое внимание.

Так, в работе [5] представлены результаты использования медленно охлаждаемых сталеплавильных шлаков (мартеновского и конвертерного), не подверженных распаду, в качестве наполнителя асфальтобетонных смесей. Показано, что шлак может стать эффективной заменой природных материалов при приготовлении шлако-асфальтобетонных смесей для городских улиц и дорог различных категорий.

Авторами исследований [6] разработаны рациональные составы сухих строительных смесей с использованием в качестве наполнителя тонкодисперсной фракции саморассыпающихся электросталеплавильных шлаков. Установлено, что физико-механические показатели растворов, приготовленных на основе разработанных штукатурных сухих смесей, отвечают нормативным требованиям, что позволяет рекомендовать разработанные составы для использования в промышленных условиях.

Существует опыт использования сталеплавильных шлаков совместно со шламами, образующимися при умягчении воды ТЭЦ, в технологии укрепления глинистых грунтов, что обеспечивает повышение прочности и водостойкости капитальных покрытий и оснований лесовозных дорог [7].

Известно использование конвертерного шлака фракций 0...20 и 20...60 мм в смеси с известняком в мартеновском производстве [8]. Это позволяет снизить удельный расход известняка на 10,5 кг/т и сократить выбросы углекислого газа на 4,2 кг/т стали.

С использованием электросталеплавильных шлаков получены силикатные бетоны автоклавного твердения плотной и ячеистой структуры. Разработаны составы бетонов плотностью 150...600 кг/м³ с повышенными прочностными свойствами [9]. Введение шлаков в сырьевую смесь позволило снизить расход наиболее энергоемких компонентов – извести и цемента на 35 – 50 % по сравнению с традиционными составами.

Известен опыт химической активации электросталеплавильного шлака, обладающего неустойчивостью структуры – подверженного распаду с образованием пылевидной фракции [10]. Показано, что сульфатная активация электросталеплавильного шлака раствором сульфата алюминия обеспечивает формирование игольчатых кристаллов гидросульфоалюмината кальция, которые, армируя структуру затвердевшего шлака, способствуют увеличению прочности материала за счет механического переплетения кристаллов. Это позволяет получить самоотверждающуюся шлаковую смесь для использования в основаниях дорожных одежд.

Однако до настоящего времени крупнотоннажного применения электросталеплавильных шлаков не реализовано. Поэтому разработка новых направлений его утилизации с получением новых продуктов является актуальной задачей.

Цель работы – исследование процесса кислотной модификации саморассыпающегося электросталеплавильного шлака, подверженного силикатному распаду, с анализом полученных продуктов и направлений их использования.

В качестве объекта исследования использовали шлак электросталеплавильного производства АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (далее ОЭМК), Россия. Далее представлены технологические характеристики шлака.

Насыпная плотность шлака, кг/м ³	1480...1610
Истинная плотность шлака, кг/м ³	3300
Содержание (СаО+MgO) _{актив.} , масс.%	0,85...11,02
Содержание магнитной фракции, масс.%	7,5...13,5

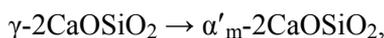
Химический состав шлака ОЭМК, масс. %: СаО – (40,0 – 8,3); SiO₂ – (20,0 – 7,2); Al₂O₃ – (2,3 – 6,3); Fe_{общ} – (7,0 – 15,5); MnO – (0,5 – 6,0); MgO – (6,0 – 12,0); Cr₂O₃ – (0,1 – 2,0); модуль основности, M_о – (1,7 – 2,0). Средний химический состав шлака ОЭМК характеризуется интервалом изменения модуля основности от 1,7 до 2,0, что относит его к основным шлакам, подверженным в процессе охлаждения силикатному распаду в результате полиморфного превращения двухкальциевого силиката из β- в γ-модификацию.

В результате объем кристаллической решетки 2CaOSiO₂ увеличивается на 10 – 13 %, что сопровождается возникновением и накоплением значительных внутренних напряжений в шлаковом монолите, релаксация

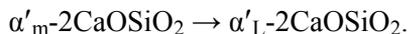
которых приводит к рассыпанию шлака в порошок. На комбинате используется гидравлическая технология охлаждения шлакового монолита, основанная на интенсификации процесса охлаждения шлака – вода распыляется по поверхности шлака при достижении температуры его поверхности около 600 °С, когда процессы кристаллизации практически завершены.

По результатам рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 1) минералогический состав шлаков гидравлического охлаждения характеризуется наличием следующих основных минералов: двухкальциевого силиката γ -модификации – γ -2CaOSiO₂ (шеннонит), CaOAl₂O₃·10H₂O, Ca(OH)₂, CaCO₃, FeO, MgO.

Наличие γ -C₂S, как основного минерала шлака ОЭМК, подтверждается результатами ДТА. Эндотермический эффект при 700 °С характеризует полиморфный переход



который начинается при 700 °С и заканчивается к 780 °С; при температуре 925 °С соответствует полиморфному переходу



В качестве химических модификаторов использовали растворы серной кислоты H₂SO₄ следующих концентраций – 1Н, 2Н, 3Н, 6Н, 8Н. Модификацию осуществляли следующим образом: растворы серной кислоты смешивали со шлаком в соотношении Т (г):Ж (мл) = 1:3 в течение 1 ч. Полученные суспензии сушили при температуре 55 °С до постоянной массы с получением порошкообразного материала, который использовали в качестве реагента комплексного действия для осветления модельных эмульсий.

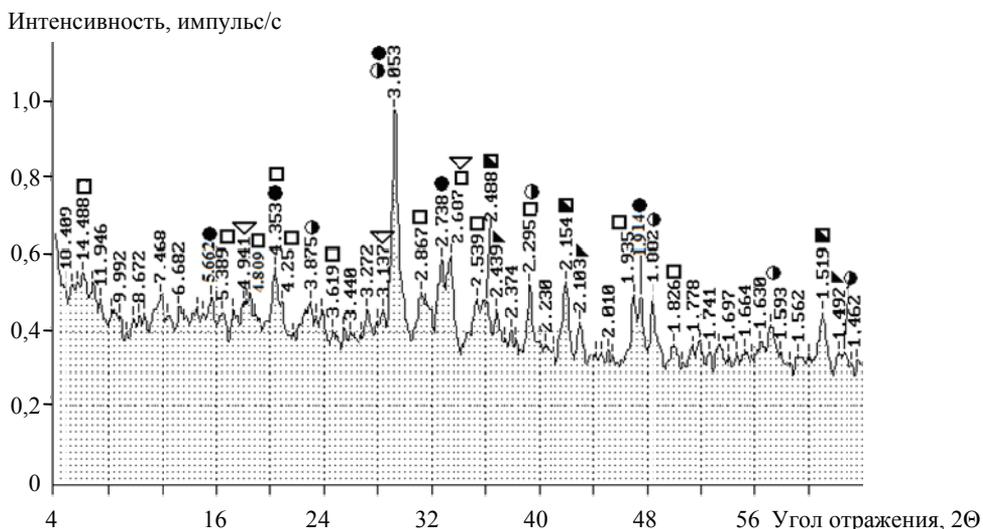


Рис. 1. Результаты РФА шлака ОЭМК гидравлического охлаждения:

● – γ -C₂S; □ – CaOAl₂O₃·10H₂O; ▽ – Ca(OH)₂; ● – CaCO₃; □ – FeO; ▲ – MgO

Опыты проводили следующим образом. В стеклянный стакан помещали 100 мл модельной эмульсии, навеску реагента, доводили pH среды до 8 добавлением раствора 2N NaOH и перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 5 минут. Массу реагента изменяли от 0,01 до 1 г. После некоторого отстаивания твердую фазу отделяли фильтрованием через фильтр «синяя лента», определяли мутность фильтрата в NTU (нефелометрических единицах мутности) и рассчитывали эффективность очистки по формуле

$$\Xi = \frac{M_n - M_k}{M_n} 100\%, \quad (1)$$

где M_n , M_k – мутность эмульсии до и после очистки соответственно, NTU.

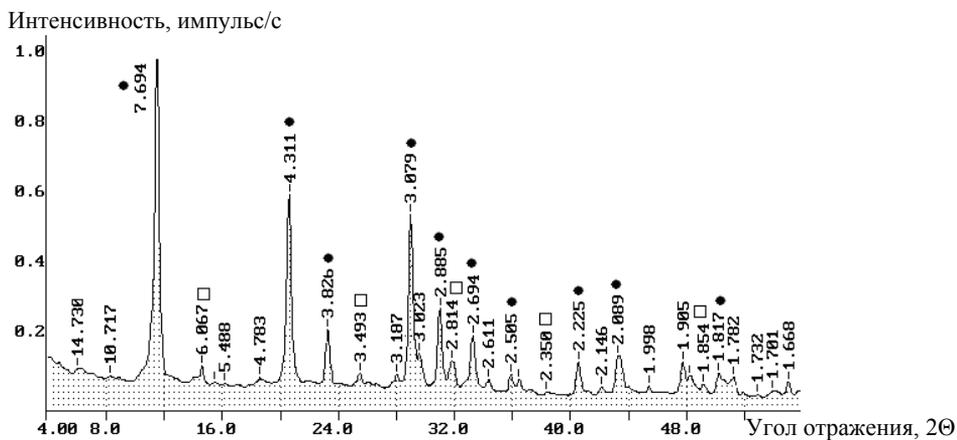
В качестве модельных сред использовали водную эмульсию липидного концентрата, полученного из личинок мухи Черная львинка (*Hermetia illucens*), с концентрацией 1 г/дм³, мутностью – 640 NTU. В состав триглицеридов липидного концентрата входят следующие кислоты, масс. %: лауриновая (23,4 – 50,7), миристиновая (3,9 – 9,5), пальмитиновая (10,5 – 16,9), олеиновая (10,2 – 27,1), стеариновая (1,8 – 5,3), линоленовая (2,4 – 17,1) [11, 12].

В результате кислотной обработки электросталеплавильного шлака ОЭМК гидравлического охлаждения происходит выщелачивание основных оксидов с образованием кристаллов дигидрата сульфата кальция и кремневой кислоты. Полученный продукт – пастообразной консистенции с влажностью 40 – 45%. Влияние концентрации серной кислоты на состав конечных продуктов кислотной модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения оценивали по результатам рентгенофазового анализа (рис. 2).

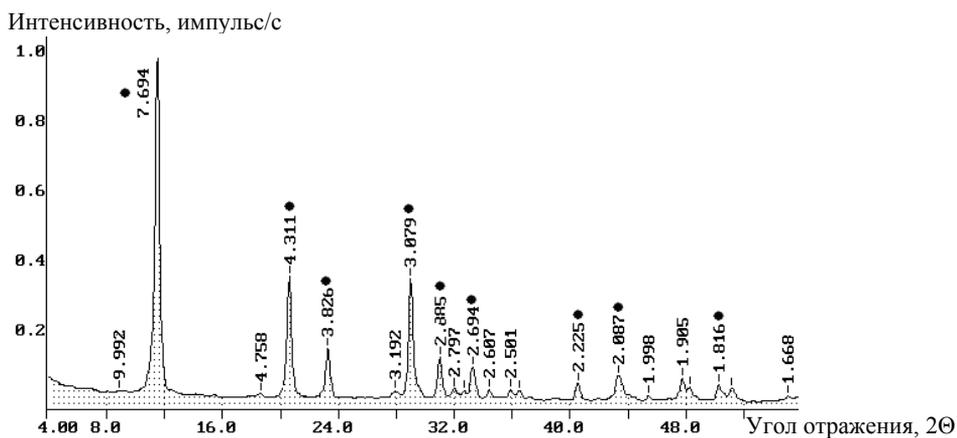
Использование раствора серной кислоты с концентрацией 8N способствует образованию полиминерального продукта, состоящего из двухводного $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и полуводного $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ сульфатов кальция, что подтверждается наличием соответствующих дифракционных максимумов значительной интенсивности.

Снижение концентрации раствора серной кислоты до 6N приводит к образованию мономинерального продукта, характеризующегося наличием преимущественно двухводного сульфата кальция, что подтверждается результатами РФА – интенсивность соответствующих пиков значительно увеличивается, отсутствуют дифракционные максимумы, характерные для полуводного сульфата кальция. Кроме того, при этом создаются условия для формирования в продуктах модификации шлака глобул кремниевой кислоты. Коагуляция высокодисперсной кремнекислоты происходит на поверхности частиц двухводного гипса в момент его кристаллизации, что, согласно данным, представленным в работе [13], способствует формированию высокодисперсной структуры $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с высокой степенью аморфизации.

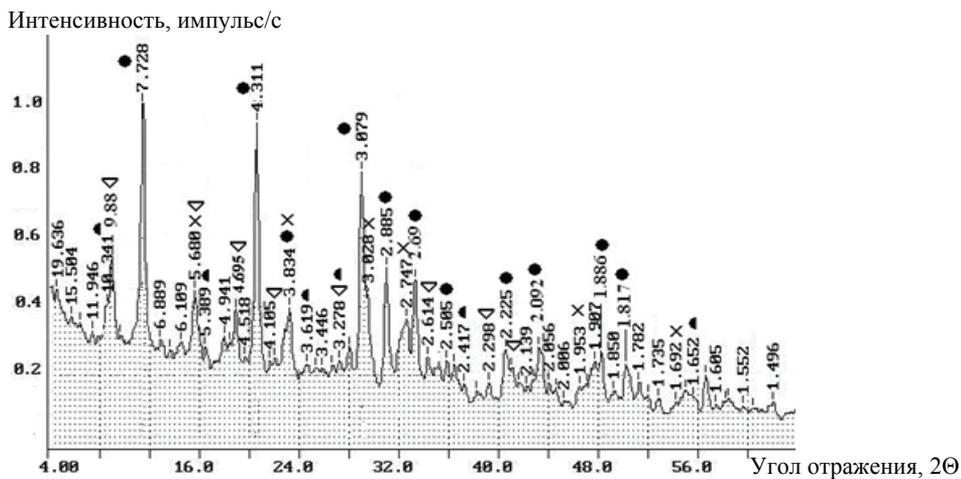
Использование более разбавленного раствора серной кислоты (3N) недостаточно для полного выщелачивания кальциевых соединений шлака ОЭМК и приводит к образованию продукта сложного минерального состава,



а)



б)



в)

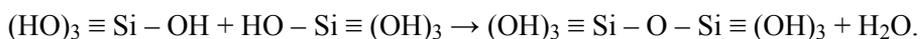
Рис. 2. Результаты РФА продуктов модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения растворами серной кислоты различной концентрации:

а – 8Н; б – 6Н; в – 3Н;

● – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; □ – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$; ▽ – эттрингит; × – $\gamma\text{-}2\text{CaOSiO}_2$; ◐ – $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

включающего, по результатам РФА, следующие компоненты: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; этtringит ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$); гидроалюминат кальция ($2\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), а также фиксируется остаточное содержание основного минерала шлака $\gamma\text{-}2\text{CaOSiO}_2$.

Анализ минералогического состава продуктов модификации шлака при использовании 1Н раствора серной кислоты показал, что увеличение соотношения Ж:Т от 1:4 до 1:8 приводит к более полному выщелачиванию компонентов шлака и образованию аморфизированного продукта. Аморфные фазы представляют собой совокупность глобул размером от 50 нм, сформировавшихся в результате поликонденсации активной кремниевой кислоты. Формирование глобул полимеризованных кремниевых кислот происходит по схеме



Доказательством протекания данного процесса является экспериментальное получение студенистого осадка кремниескислот в процессе кислотной модификации шлака. Это дает основание считать использование модифицирующих растворов серной кислоты с пониженными концентрациями – в интервале 3Н...1Н достаточным для достижения максимальных концентраций кремниевых кислот в полученном продукте. Известно, что кремниевая кислота является минеральным флокулянт, а сульфат железа (III) – коагулянт. Следовательно, полученный продукт модификации может быть использован как полифункциональный реагент в системах очистки вод.

Результаты исследований условий модификации шлака растворами серной кислоты показывают, что основными компонентами продуктов модификации являются сульфат кальция различной степени обводнения (двуводный, полуводный и безводный сульфат кальция), сульфаты железа и коллоидная кремниевая кислота. Учитывая данный факт, возможны следующие направления использования продуктов кислотной модификации электросталеплавильного шлака:

- как потенциальное сырье для получения гипсовых вяжущих веществ и строительных материалов на их основе;
- как реагент адсорбционно-коагуляционно-флокуляционного действия для очистки сточных вод.

Получение гипсовых вяжущих с использованием в качестве исходного сырья продуктов кислотной модификации шлака ОЭМК показано в работе [14].

В данной работе рассматривается возможность использования продуктов кислотной модификации шлаков ОЭМК в качестве полифункционального реагента – железокремниевый флокулянт-коагулянт (**ЖКФК**) для очистки сточных вод от эмульгированных жировых загрязнений.

Результаты, представленные на рис. 3, показали, что наиболее эффективным является использование ЖКФК – продукта кислотной модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения, полученного при соотношении компонентов модификации – Т (г):Ж (мл) = 1:8. В интервале расхода ЖКФК 0,01...0,1 г эффективность очистки эмульсии изменяется в пределах 72 – 98,8 % соответственно. Минимальный расход порошкообразного ЖКФК, обеспечивающего эффективность очистки эмульсии 98,8 %, составляет 0,01 г.

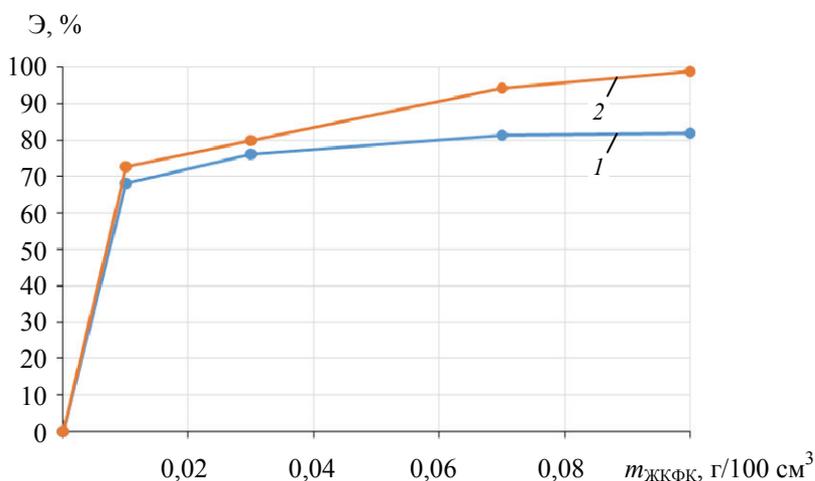


Рис. 3. Зависимости эффективности очистки модельной эмульсии от массы реагента, полученного в результате химической модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения при соотношении Т(г):Ж(мл):
 1 – 1:04; 2 – 1:08

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- в результате кислотной модификации электросталеплавильного шлака ОЭМК гидравлического охлаждения происходит выщелачивание основных оксидов с образованием кристаллов сульфата кальция и геля кремневой кислоты;

- концентрация серной кислоты, используемой в качестве модификатора, и соотношение Ж:Т оказывает влияние на минеральный состав продуктов модификации. С увеличением концентрации раствора кислоты от 6 Н до 17,5 Н в полученном продукте уменьшается содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и увеличивается содержание безводного CaSO_4 ;

- для использования продуктов кислотной модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения в качестве исходного сырья для получения гипсовых вяжущих эффективно использование раствора серной кислоты с концентрацией 6Н, что обеспечивает формирование преимущественно дигидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и геля кремневой кислоты;

- использование растворов серной кислоты пониженной концентрации для модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения, но при увеличенном соотношении Ж:Т, обеспечивает полноту выщелачивания основных компонентов шлака с образованием значительного количества кремневой кислоты. Это позволяет использовать полученный продукт модификации в качестве железокремниевго флокулянта-коагулянта для очистки эмульгированных сточных вод. Минимальный расход порошкообразного флокулянта-коагулянта составляет 0,01 г на 100 мл эмульсии с концентрацией 1 г/дм³ и мутностью 640 NTU, что обеспечивает 98,8 % эффективности очистки.

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

Список литературы

1. Корнеева, Е. В. Использование электросталеплавильного шлака в производстве бесклинкерного вяжущего / Е. В. Корнеева, Г. И. Бердов // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 35 – 40. doi: 10.14529/build180305
2. Корнеева, Е. В. Использование электросталеплавильного шлака в производстве строительных материалов / Е. В. Корнеева, В. А. Корнеев // Вестн. Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 45 (64). – С. 45 – 53.
3. Глиношлаковые материалы автоклавного твердения на основе саморассыпающихся сталеплавильных шлаков / Ю. Л. Старостина, Н. С. Лупандина, Ю. С. Воронина, И. В. Старостина // Вестн. Белгородского гос. технологического ун-та им. В. Г. Шухова. – 2012. – № 3. – С. 170 – 174.
4. Использование отходов металлургического производства для удаления нефтепродуктов с поверхности воды и почвы / Ю. К. Рубанов, И. В. Старостина, М. М. Ариас, Е. В. Блайдо // Вестн. Белгородского гос. технологического ун-та им. В. Г. Шухова. – 2009. – № 4. – С. 126–127.
5. Пименов, А. Т. Обоснование возможности применения отходов металлургического производств при строительстве и ремонте дорожных покрытий и оснований / А. Т. Пименов, В. С. Прибылов // Вестн. Сибирского гос. ун-та путей сообщений. – 2021. – № 2 (57). – С. 42 – 48. doi: 10.52170/1815-9265_2021_57_42
6. Шлаки металлургического производства – эффективное сырье для получения сухих строительных смесей / Н. А. Шаповалов, Л. Х. Загороднюк, И. В. Тикунова [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-1. – С. 167 – 172.
7. Штефан, Ю. В. Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками / Ю. В. Штефан, Б. А. Бондарев // Строительные материалы. – 2020. – № 4-5. – С. 80 – 89. doi: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89
8. Остроушко, А. В. К вопросу рециклинга металлургических шлаков как одного из направлений эколого-экономического и инновационного развития предприятий ГМК / А. В. Остроушко, А. А. Алешин, В. А. Алешина // Экология и промышленность России. – 2012. – № 4 (33). – С. 103 – 108.
9. Старостина, И. В. Использование саморассыпающихся электросталеплавильных шлаков в технологии силикатных бетонов : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Старостина Ирина Викторовна. – Белгород, 2002. – 226 с.
10. Калыска, А. О. Активация процессов твердения электросталеплавильных шлаков и блокирование ионов тяжелых металлов / А. О. Калыска, А. В. Бусел // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 83 – 87.
11. Использование биомассы насекомых для выращивания радужной форели в аквакультуре (краткий обзор зарубежной литературы) / И. Г. Шайхиев, С. В. Свергузова, Ж. А. Сапронова [и др.] // Вестн. Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Рыбное хозяйство. – 2021. – № 1. – С. 69 – 81. doi: 10.24143/2073-5529-2021-1-69-81
12. Van Huis, A. Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security / A. Van Huis // Annual Review of Entomology. – 2013. – Vol. 58. – P. 563 – 583. doi: 10.1146/annurev-ento-120811-153704

13. Белецкая, В. А. Особенности структурообразования коллоидной кремнекислоты в техногенных солевых растворах / В. А. Белецкая, Е. Л. Румянцева // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2012. – Т. 55, № 1. – С. 63 – 67.

14. Пономарева, И. А. Переработка сталеплавильных шлаков с получением гипсовых композиционных материалов / И. А. Пономарева, И. В. Старостина // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 24–25 ноября 2015 г., Белгород. – Белгород, 2015. – Т. III. – С. 221 – 227.

References

1. Korneyeva Ye.V., Berdov G.I. [The use of electric arc furnace slag in the production of clinker-free binder], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 35-40, doi: 10.14529/build180305 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Korneyeva Ye.V., Korneyev V.A. [The use of electric arc furnace slag in the production of building materials], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture], 2016, no. 45 (64), pp. 45-53. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Starostina Yu.L., Lupandina N.S., Voronina Yu.S., Starostina I.V. [Clay and slag materials of autoclave hardening based on self-disintegrating steel-smelting slags], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov], 2012, no. 3, pp. 170-174. (In Russ.)

4. Rubanov Yu.K., Starostina I.V., Arias M.M., Blaydo Ye.V. [Use of metallurgical waste to remove oil products from the surface of water and soil], *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov], 2009, no. 4, pp. 126-127. (In Russ.)

5. Pimenov A.T., Pribylov V.S. [Substantiation of the possibility of using metallurgical waste in the construction and repair of road pavements and bases], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniy* [Bulletin of the Siberian State University of Communications], 2021, no. 2 (57), pp. 42-48, doi: 10.52170/1815-9265_2021_57_42 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Shapovalov N.A., Zagorodnyuk L.Kh., Tikunova I.V., Shchekina A.Yu., Shkarin A.V. [Slags of metallurgical production - an effective raw material for obtaining dry building mixtures], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, no. 1-1, pp. 167-172. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Shtefan Yu.V., Bondarev B.A. [Strengthening clay soils of temporary logging roads with industrial waste and metallurgical slags], *Stroitel'nyye materialy* [Construction materials], 2020, no. 4-5, pp. 80-89, doi: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ostroushko A.V., Aleshin A.A., Aleshina V.A. [On the issue of recycling of metallurgical slags as one of the directions of ecological, economic and innovative development of MMC enterprises], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry in Russia], 2012, no. 4 (33), pp. 103-108. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Starostina I.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Belgorod, 2002, 226 p. (In Russ.)

10. Kalyska A.O., Busel A.V. [Activation of the processes of hardening of electric steel-smelting slags and blocking of heavy metal ions], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki* [Bulletin

of the Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Science], 2015, no. 8, pp. 83-87. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Shaykhiyev I.G., Sverguzova S.V., Sapronova Zh.A., Svyatchenko A.V., Ushakova N.A. [The use of insect biomass for growing rainbow trout in aquaculture (a brief review of foreign literature)], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoye khozyaystvo* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries], 2021, no. 1, pp. 69-81, doi: 10.24143/2073-5529-2021-1-69-81 (In Russ.)

12. Van Huis A. Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security, *Annual Review of Entomology*, 2013, vol. 58, pp. 563-583, doi: 10.1146/annurev-ento-120811-153704

13. Beletskaya V.A., Rumyantseva Ye.L. [Features of structure formation of colloidal silicic acid in technogenic salt solutions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2012, vol. 55, no. 1, pp. 63-67. (In Russ.)

14. Ponomareva I.A., Starostina I.V. *Energo- i resursosberegayushchiye ekologicheski chistyye khimiko-tekhnologicheskiye protsessy zashchity okruzhayushchey sredy* [Energy- and resource-saving environmentally friendly chemical-technological processes of environmental protection], Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, 24-25 November, 2015, Belgorod, 2015, vol. III, pp. 221-227. (In Russ.)

Properties and Directions for the Use of Chemically Modified Steel-Making Slag

**I. V. Starostina, A. S. Lushnikov,
Yu. L. Makridina, M. A. Pisklov**

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

Keywords: gypsum binders; iron-silicon flocculant-coagulant; acid modification; model emulsion; solution of sulfuric acid; calcium sulfate; electric steel-smelting self-disintegrating slag; cleaning efficiency.

Abstract: The results of a study of the effect of acid modification conditions of self-disintegrating electric steel-smelting slag on the mineral composition of the resulting product and possible directions for its use are presented. It is shown that as a result of acid modification of electric arc furnace slag, basic oxides are leached with the formation of calcium sulfate crystals of varying degrees of watering and silicic acid. An increase in the concentration of the acid solution from 6 to 17.5 N leads to a decrease in the content of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and an increase in the content of anhydrous CaSO_4 in the resulting product.

© И. В. Старостина, А. С. Лушников,
Ю. Л. Макридина, М. А. Писклов, 2022