

УДК 669.054.82

В.М. ПАРШИН, докт. техн. наук, директор,
А.Д. ЧЕРТОВ, канд. техн. наук, заместитель директора, **А.Г. ШАКУРОВ**, старший научный сотрудник
ЦНРС, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва
В.Н. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук, генеральный директор
ООО НПП «Энерготерм-система», г. Москва
О.В. ФЕДОТОВ, директор филиала, **Д.В. МОРОВ**, начальник цеха
Филиал ОАО «ОМК-Сталь», г. Москва

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ В КОНДИЦИОННЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Впервые в России получен кондиционный инертный наполнитель для дорожных покрытий путем одностадийной переработки жидких сталеплавильных шлаков, совмещающей процессы охлаждения, кристаллизации, дробления и получения конечной товарной продукции в одном агрегате, что исключает необходимость хранения шлаков в отвалах и существенно снижает материало- и энергоёмкость производства.

Ключевые слова: сталеплавильный шлак, щебень, шлаковый расплав, кристаллизатор барабанный, шаровая насадка.

Проблеме утилизации техногенных железосодержащих отходов во всем мире уделяется большое внимание [1, 2]. Особенно актуальна эта проблема для Российской

Федерации, где, по оценке Уральского института металлов, на предприятиях черной металлургии в отвалах накоплено более 306 млн т отходов [1].

© В.М. Паршин, А.Д. Чертов, А.Г. Шакуров, В.Н. Ковалев, О.В. Федотов, Д.В. Мороз



Эффективность работы металлургических предприятий в значительной степени зависит от рационального использования техногенных отходов, образующихся в процессе выплавки стали. В условиях современного развития металлургической отрасли и ужесточения требований по ресурсо- и энергосбережению при производстве продукции технологические процессы и оборудование, применяемые при переработке техногенных отходов, требуют коренной модернизации.

Выход сталеплавильного шлака составляет в среднем от 150 до 200 кг/т стали на плавку. При существующих объемах производства стали в РФ ежегодно образуется в среднем 9 млн т шлаков сталеплавильного производства. Утилизация таких шлаков – сложный процесс, который включает уборку и транспортировку шлакового расплава от сталеплавильного агрегата, охлаждение и длительное хранение в отвалах с последующей переработкой твердой части в шлаковый щебень на многоступенчатых дробильно-сортировочных комплексах (ДСК), сопровождающейся извлечением до 60 % металлического железа.

Шлаки в основном перерабатывают в твердом и жидком состояниях. К общим недостаткам существующих схем переработки шлаков в твердом состоянии относятся:

- использование под шлаковые отвалы и ДСК больших производственных площадей;
- низкая степень извлечения металлического железа;
- высокая зашлакованность извлеченного железа;
- сложность локализации парогазовых и пылевых выбросов;
- невозможность переработки шлака вблизи сталеплавильного агрегата;
- многоступенчатость процесса дробления и сортировки шлака.

Из всех известных направлений переработки жидких сталеплавильных шлаков (механическое дробление, грануляция с использованием жидкостных и газообразных энергоносителей) практическое применение нашел способ получения шлакового щебня путем охлаждения расплава на металлической поверхности в агрегатах барабанного типа с шаровой насадкой [3]. В такой установке шлаковый расплав попадает в емкость, заполненную шарами, проникает в межшаровое пространство и охлаждается ниже температуры затвердевания. В 1998 г. комбинат «Баостил» (КНР) по российской лицензии успешно запустил в работу подобную установку и впервые в мире показал эффективность переработки жидких шлаков в установках барабанного типа с шаровой насадкой. Однако их существенными недостатками до настоящего времени остаются низкая производительность

и получение наименее востребованного в строительной индустрии мелкозернистого продукта, на 80 % состоящего из фракций 0–10 мм, с высокой влажностью 12–15 %.

Отмечая наличие многих положительных аспектов практического использования металлических шаров в качестве активных холодильников, необходимо подчеркнуть, что режимы течения расплава в шаровой насадке, кинетика кристаллизации и теплофизические явления в процессе охлаждения шлакового расплава в межшаровом пространстве изучены пока недостаточно. В то же время регулирование скорости охлаждения расплава является основным средством воздействия на процессы фазовых превращений при кристаллизации шлака, поэтому их анализ с теплофизической точки зрения охлаждения шлака в межшаровом пространстве представляет особый интерес.

Доминирующее влияние на величину теплоотдачи от жидкого шлака к металлическому шару оказывает режим течения расплава в шаровой насадке, зависящий от числа Рейнольдса (критерия подобия движения вязкой жидкости). Эта смешанная задача определяется общими закономерностями обтекания твердых тел (шаров) жидкой средой и течением жидкости по каналам, образованным шаровой насадкой.

При фильтрации шлакового расплава через шаровую насадку он охлаждается, его вязкость увеличивается, а скорость течения уменьшается. Критерий Рейнольдса для шара при этом может изменяться от 10^4 до 1, достигая критического значения при $Re_{кр} \approx 50$. Как показывают многочисленные опытные данные по теплоотдаче, при вынужденном обтекании отдельного шара имеет место зависимость [4]

$$Nu_c = 2 + 0,03Pr^{0,33} \cdot Re^{0,64} + 0,35Pr^{0,36} \cdot Re^{0,58},$$

где Nu_c и Pr – безразмерные критерии Нуссельта и Прандтля соответственно.

Модель теплового баланса позволяет определить равновесную температуру системы, установить оптимальное соотношение «шлаковый расплав – металлические шары» и необходимый расход воды на охлаждение, разработать технологические способы управления скоростью охлаждения шлакового расплава. Кроме того, с ее помощью можно влиять на фазовые превращения при кристаллизации для получения стабильной структуры.

Тепловой баланс системы:

$$\Delta H_{шл} = \Delta H_{шн} - \Delta H_{фл} + \Delta H_{в} + \Delta H_{л},$$

где $\Delta H_{шн} = c_{шн} \cdot M_{шн} \cdot (T_0 - T_k)$ – тепло, вносимое шлаковым расплавом, кДж,

$\Delta H_{\text{ф.п.}} = M_{\text{шл}} \cdot \beta \cdot q_{\text{шл}}$ – тепло, выделяемое при фазовом переходе (кристаллизации) шлака, кДж,

$\Delta H_{\text{в}} = M_{\text{в}} [c_{\text{в}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{в}})] - q_{\text{в}}$ – тепло, затрачиваемое на нагрев и парообразование охлаждающей воды, кДж,

$$\Delta H_{\text{изл}} = \frac{4}{5} c_{\text{шл}} \left[\frac{(T_0 - T_k)}{100} \right]^4 \cdot R_{\text{шл}}^2 \cdot N_{\text{шл}}^2 \cdot \tau_n$$

– тепло, идущее

на излучение укладки, кДж,

$\Delta H_{\text{ш.н}} = c_{\text{м}} M_{\text{м}} (T_0 - T_{\text{ср}})$ – тепло, затрачиваемое на нагрев шаровой насадки, кДж,

$$T_{\text{ср}} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 T(r, t) dr$$

– средняя температура металличе-

ских шаров, К,

где T_0, T_k – начальная и конечная температуры системы «шлак – металлические шары», К; $M_{\text{шл}}, M_{\text{м}}$ – массы шлакового расплава и металла, кг; $c_{\text{шл}}, c_{\text{м}}, c_{\text{в}}$ – теплоемкости шлака, металла и воды соответственно, Дж/(кг·К); $q_{\text{шл}}$ – скрытая теплота кристаллизации шлака, кДж/кг; $R_{\text{шл}}$ – радиус шаров, м; $N_{\text{шл}}$ – количество шаров в насадке, шт.; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения воды, К; $T_{\text{в}}$ – температура воды, К; $q_{\text{в}}$ – теплота парообразования, кДж/кг; τ_n – полное время охлаждения шлака, с.

С использованием метода определения теплового баланса получено соотношение масс шлакового расплава и металла. Расчетные значения $M_{\text{шл}}/M_{\text{м}}$ лежат в пределах 0,15–0,24, что было подтверждено при физическом моделировании условий ускоренного охлаждения и кристаллизации шлакового расплава в шаровой насадке [5].

Анализ кривых динамики охлаждения шлакового расплава в межшаровом пространстве (диаметры шаров – 120 и 100 мм) (рис. 1), построенных на основании эмпирических данных, позволяет сделать вывод о том,

что отвод тепла от жидкого шлака к холодным металлическим шарам происходит по трем ступеням с фазовыми переходами и различной интенсивностью охлаждения на каждой из них. Возможность регулирования скорости охлаждения шлакового расплава позволяет стабилизировать ковшовые шлаки и получать кусковой продукт.

Следует отметить, что силикатный самораспад шлака связан с полиморфным превращением одной из его основных фаз – двухкальциевого силиката – в низкотемпературную модификацию $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ с увеличением объема до 12 %. Предотвратить этот процесс можно путем термической стабилизации, при которой кристаллизация тормозится резким охлаждением и двухкальциевый силикат принимает форму наиболее стабильной высокотемпературной модификации $\beta\text{-C}_2\text{S}$.

Проведенные исследования позволили установить оптимальное соотношение «шлаковый расплав – металл» и расход воды, необходимый на охлаждение, разработать технологические приемы управления скоростью охлаждения шлакового расплава и влиять на фазовые превращения при кристаллизации для получения стабильной структуры.

С учетом накопленного опыта, проведенных исследований и анализа недостатков существующих технических решений разработана и изготовлена опытно-промышленная установка – кристаллизатор барабанный (КБ) для переработки жидких сталеплавильных шлаков (ее номинальная производительность – 3 т/мин, максимальная – 5 т/мин). Общая масса установки с шаровой насадкой составляет 60 т.

В 2012 г. ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» совместно с Объединенной металлургической компанией (ОМК) и ООО «Энерготерм-система» в рамках го-

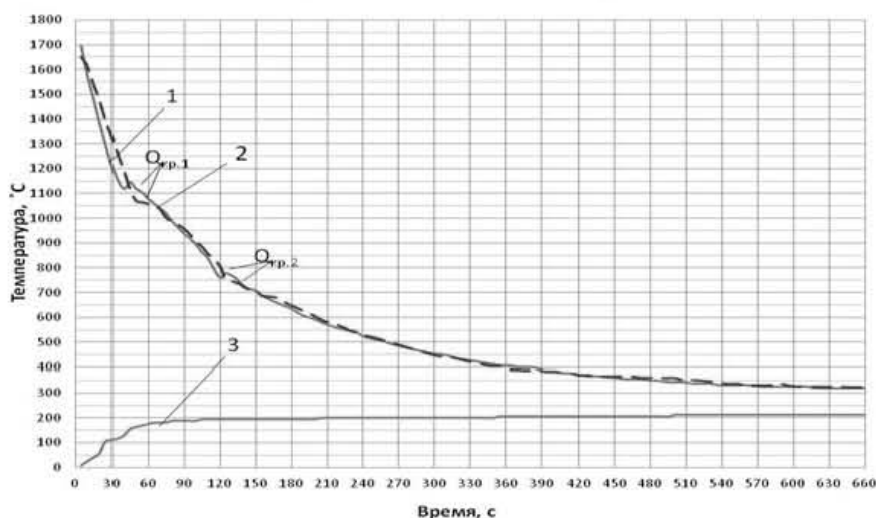


Рисунок 1 – Динамика охлаждения и кристаллизации шлакового расплава в межшаровом пространстве:

1, 2 – кривые охлаждения шлакового расплава на шарах диаметром 120 мм и 100 мм, 3 – кривая нагрева металлического шара в шаровой насадке; $Q_{\text{кр1}}, Q_{\text{кр2}}$ – скрытая теплота фазовых превращений



сударственного контракта провели в ЭСПЦ филиала ОАО «ОМК-Сталь» (г. Выкса) серию опытно-промышленных испытаний технологии и установки КБ (рис. 2) с получением кондиционного наполнителя, отвечающего ГОСТ 3344 и пригодного для дорожного строительства.

За весь цикл испытаний было переработано более 9 т шлакового расплава с начальной температурой 1540–1600 °С – более 5 т электропечных и около 4 т ковшовых (распадающихся) шлаков. Основные результаты опытно-промышленных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты опытно-промышленных испытаний

Параметры	Значения
Температура шлакового расплава, подаваемого в агрегат, °С	1540–1600
Средняя температура шлакового продукта на выходе из установки, °С	550–700
Общее количество шлака, переработанного в агрегате БК при этом	9,3
• печных шлаков, т	5,2
• ковшовых шлаков и металла, т	4,1
Средняя интенсивность переработки расплава в агрегате, т/мин	2,0–2,6
Максимальная интенсивность, т/мин	3,5–4,0
Удельный расход воды на охлаждение шлака, м ³ /т	0,3–0,5
Мощность, потребляемая двигателем, кВт	17,5–18,0

В процессе переработки шлаков в колосниковом барабане шлаковый расплав контактирует с холодной поверхностью металлических шаров и дополнительно охлаждается водой. При этом происходят закалочное охлаждение и термическая стабилизация структуры шлаков, в результате чего они приобретают щебневидную форму, устойчивую ко всем видам распада, что было подтверждено опытно-промышленными испытаниями по стабилизации жидких ковшовых (распадающихся) шлаков. Отметим, что вместе со шлаком в установку сливался расплавленный металл. Были получены: кондиционный наполнитель, щебень, содержащий известь, а также металлический скрап (рис. 3).

В табл. 2 и на рис. 4 даны сравнительные характеристики фракционного состава продуктов, полученных ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и «Баостил» (КНР).

Таблица 2 – Распределение фракционного состава

Фракция, мм	0–1,25	1,25–5	5–10	10–40	>40
ЦНИИЧМ – TRSS	0,2	10,0	16,5	67,7	5,6
Baosteel – BSGP	17,1	58,7	13	9,2	2,0

Сравнение свидетельствует о повышении качества продукта с увеличением его крупности, при этом более 80 % продукции ЦНИИчермет приходится на фракцию 5–40 мм, в то время как у «Баостила» более 80 % составляет фракция 0–10 мм.

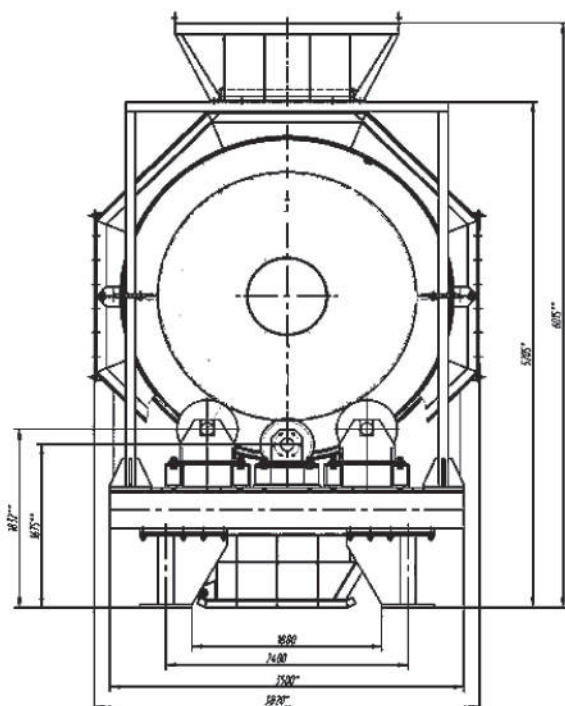


Рисунок 2 – Кристаллизатор барабанный с шаровой насадкой

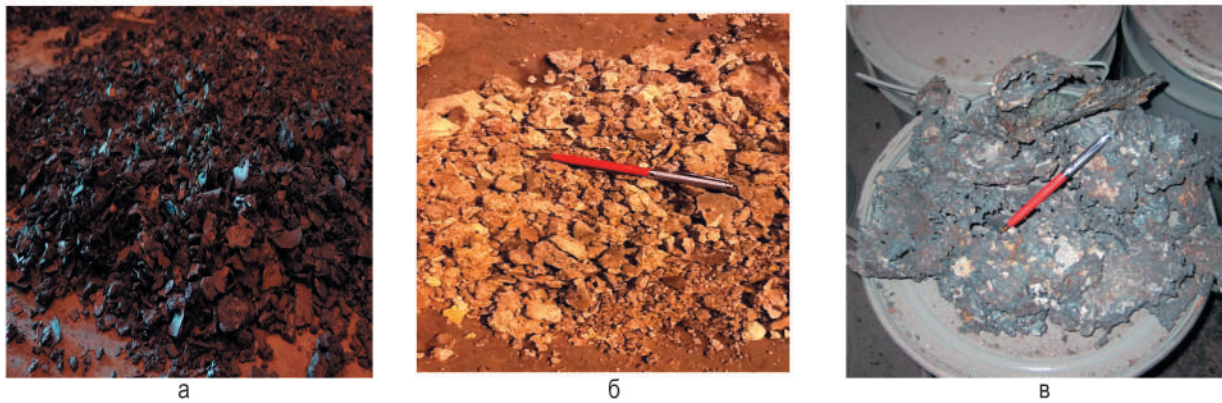


Рисунок 3 – Товарная продукция из шлаков:

а – кондиционный наполнитель; б – щебень, содержащий известь; в – металлический скрап

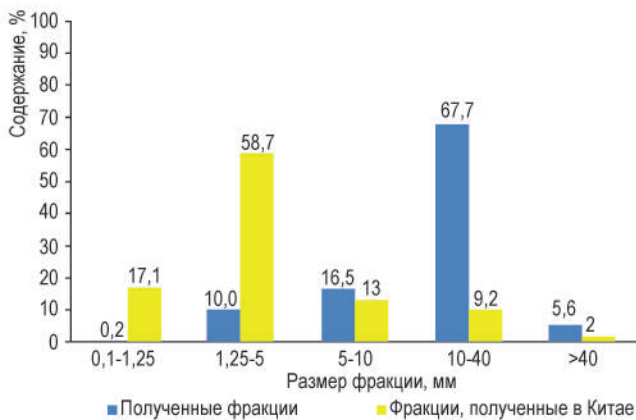


Рисунок 4 – Сравнение фракционного состава продукции

На рис. 5 представлен технологический комплекс переработки и стабилизации жидких сталеплавильных шлаков TRSS. Основным агрегатом комплекса является КБ: в него сливается шлаковый расплав и там же происходит кристаллизация с формированием зернового состава. Далее полупродукт попадает на транспортер-доохладитель, где его температура опускается до 100–200 °С. На этапах охлаждения предусматривается отвод парогазовой смеси с возможностью использования тепла шлака для получения электроэнергии. Охлажденный продукт при необходимости отправляют на рассев по фракциям (I) с попутным извлечением металлического скрапа и корольков (не менее 90 %) или напрямую потребителю (II).

Выводы

Внедрение разработанного технологического комплекса TRSS по переработке жидких сталеплавильных шлаков в товарную продукцию на металлургическом предприятии дает следующие технико-экономические и экологические преимущества:



Рисунок 5 – Технологический комплекс переработки и стабилизации жидких сталеплавильных шлаков TRSS

- исключение необходимости использования новых площадей под шлаковые отвалы;
- получение более 80 % товарного продукта крупной фракции 5–40 мм;
- стабилизацию структуры рафинировочных (белых) шлаков;
- выход годного продукта в объеме не менее 98 %;
- высокую степень извлечения металлического железа (не менее 90 %);
- применимость для переработки других высокотемпературных расплавов, в т.ч. металлов и ферросплавов;
- сокращение материальных и энергетических затрат на производство продукции;
- возможность локализации парогазовых и пылевых выделений;
- экологическую безопасность процесса;
- размещение головного агрегата рядом со сталеплавильным.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смирнов, Л.А.** Переработка и использование техногенных отходов металлургического производства / Л.А. Смирнов, Л.И. Леонтьев, Ю.В. Сорокин // *Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов* : тр. междунар. конгресса. – Екатеринбург, 2012. – С. 15–19.
2. **Косырев, К.Л.** Предпосылки и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов / К.Л. Косырев, В.М. Паршин, А.П. Фоменко // *Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов* : тр. междунар. конгресса. – Екатеринбург, 2012. – С. 41–46.
3. **Патент RU № 2018494 C04B5/02.** Способ переработки шлака и установка для его осуществления / Школьник Я.Ш., Демин Б.Л., Сорокин Ю.В. и др. ; опубл. 30.08.1994 ; Бюл. № 16.
4. **Кутателадзе, С.С.** Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М. : ГЭИ, 1958. – 414 с.
5. Охлаждение и кристаллизация шлакового расплава в межшаровом пространстве / А.Г. Шакуров, Я.Ш. Школьник, В.М. Паршин, А.Д. Чертов, В.В. Журавлев // *Сталь*. – 2012. – № 5. – С. 19–22.

Поступила в редакцию 15.04.2013

Вперше в Росії отримано кондиційний інертний наповнювач для дорожніх покриттів шляхом одностадійної переробки рідких сталеплавильних шлаків, яка суміщає процеси охолодження, кристалізації, дроблення і отримання кінцевої товарної продукції в одному агрегаті, що виключає необхідність зберігання шлаків у відвалах і суттєво знижує матеріало-і енергоємність виробництва.

For the first time in Russia it is obtained conditioned inert filler for road surfaces by a single-step processing of liquid steel slag, combining the processes of cooling, crystallization, crushing and a final marketable product obtaining in one unit that eliminating necessity of slag storage and significantly reducing material and energy intensity of production.