



УДК 66.046.58

А.В. ОСТРОУШКО, канд. техн. наук, доцент, директор

Институт ресурсосбережения государственного высшего учебного заведения «Приазовский государственный технический университет» (ИРС ГВУЗ «ПГТУ»), г. Мариуполь

А.А. АЛЕШИН, доктор экономики, директор, **В.А. АЛЕШИНА**, референт

Департамент вторичных ресурсов Ассоциации предприятий черной металлургии Украины (УкрМет), г. Киев

К ВОПРОСУ РЕЦИКЛИНГА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ КАК ОДНОГО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО И ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГМК

Приведен анализ проблемы использования металлургических шлаков путем повышения их доли в технологических процессах взамен природного сырья по принципу рециклинга. В результате исследования установлено рациональное соотношение доли конвертерного шлака в смеси с известняком, обеспечивающее утилизацию конвертерного шлака в мартеновской плавке, снижение удельного расхода известняка на 10,5 кг/т и выделений в атмосферу углекислого газа на 4,2 кг/т стали соответственно. Показана целесообразность применения в аглодоменном производстве мартеновского шлака фракций 0–20 и 20–60 мм.

Ключевые слова: металлургические шлаки, технологические процессы, рециклинг, мартеновская плавка, мартеновский шлак, конвертерный шлак, известняк, рациональное соотношение, углекислый газ, аглодоменный процесс, вторичные материальные ресурсы.

Экономическая и экологическая ситуация в Украине в значительной степени определяется функционированием горно-металлургического комплекса (ГМК) с его наиболее материалоемкими процессами, сопровождающимися образованием большого количества веществ, определенная часть которых может служить

дополнительным источником сырья и энергии техногенного происхождения и в то же время оказывать негативное влияние на окружающую среду.

В результате многолетней научной и практической деятельности авторы установили [1, 2], что решение проблем экологии и ресурсосбережения в ГМК должно

осуществляться за счет реализации инновационной модели развития производства с приоритетным внедрением ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих сокращение балластных отходов и производственных издержек.

В 2004 г. Украина ратифицировала Киотский протокол, согласно которому установлены требования по количественному ограничению и сокращению выбросов парниковых газов, а также повышению эффективности использования энергии в соответствующих секторах национальной экономики [3].

В то же время при анализе экологических показателей металлургического производства многие отечественные исследователи приводят данные по количеству выбросов только таких вредных газов, как монооксид углерода, диоксид серы и азота, но не уделяют должного внимания содержанию в выбросах углекислого газа, количество которого при этом достаточно велико. Также широко известен факт относительно высоких удельных затрат энергии, которые, к примеру, в сталеплавильном производстве Украины выше, чем в сталелитейных компаниях Европы, в 4,7 раза.

Целью настоящей работы является анализ перспективности и эффективности использования одного из наиболее доступных в настоящее время способов улучшения экономических и экологических показателей металлургического производства – повышения доли отходов (вторичных материальных ресурсов), в частности шлаков, в технологических процессах вместо природного сырья по принципу рециклинга, что дает возможность снизить расход шихтовых материалов и выбросы углекислого газа в окружающую среду.

Составы некоторых сталеплавильных шлаков, пригодных для рециклинга, приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, конвертерные шлаки содержат полезные для доменной плавки компоненты, использование которых позволяет сократить расход природного сырья в шихте. Помимо железа, содержащегося в виде оксидов и металла, в шлаках имеется значительное количество оксида кальция, оксидов магния и марганца, использование которых способствует экономии флюсов и марганецсодержащих компонентов шихты. Конвертерный шлак может служить эффективной заменой известняка в доменной плавке [4–7]. Некоторыми исследованиями [4] показано, что применение конвертерного шлака приводит к незначительному увеличению выхода доменного шлака, но ухудшения газопроницаемости столба шихтовых материалов не происходит, так как конвертерный шлак расплавляется в горне доменной печи при высоких температурах. Следовательно, при загрузке подготовленного шлака в печь происходит разрыхление столба шихты и улучшение его газопроницаемости. При этом улучшается десульфурация чугуна за счет формирования основного доменного шлака в горне печи. Улучшаются технико-экономические показатели печей, экологические условия на участке шлакопереработки.

Замена известняка конвертерным шлаком в шихте мартеновской плавки также приводит к увеличению массы первичного шлака и снижению количества диоксида углерода, который выделяется при разложении известняка. Массу шлака, который образуется при использовании 1 кг смеси известняка с конвертерным шлаком, можно определить с учетом того, что при разложении 1 кг известняка в шлак переходит

$$1 * (\%CaCO_3) * M_{CaO} / M_{CaCO_3} = 1 * 95 * 56 / 100 * 100 = 0,53 \text{ кг}$$

Таблица 1 – Химический состав сталеплавильных шлаков, пригодных для рециклинга

№ шлаков	Химический состав, % мас.										Ссылка на источник
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	S	Fe общ	P ₂ O ₅	
	Конвертерные										
1	44,5	6,0	17,4	1,2	5,1	14,3	8,4	0,12	19,5	0,95	[4]
2	37,4–48,3	5,6–9,3	7,1–18,5	0,9–3,1	1,4–5,9	8,4–25,1	8,4–15,2	0,06–0,14	12,3–28,4	0,36–1,4	[6]
3	Конвертерный твердый										
	40,3	6,6	12,2	2,0	2,0	10,0	14,3	0,08	26,6		[6]
4	Конвертерный жидкий										
	40,9	6,4	12,4	1,6	2,3	14,4	16,0	0,07	24,6		[6]
5	Отвальный мартеновский										
	36,5	6,8	12,5	4,7	2,2	11,7	14,3	0,14	27,8		[6]
6	Отвальный конвертерный										
	37,8	6,5	22,2	2,8	6,1	17,0	7,7		19,6		[7]



оксида кальция, а конвертерный шлак усваивается шлаком полностью. Исходя из этого, масса шлака, который образуется, определяется из уравнения

$$m_{\text{шл}} = 0,53 \cdot m_{\text{изв}} + m_{\text{кшл}} \quad (1)$$

где $m_{\text{изв}}$ – масса известняка в смеси, кг;
 $m_{\text{кшл}}$ – масса конвертерного шлака, кг.

Поделив обе части уравнения на массу исходной смеси, которая равна 1 кг, найдем удельный выход шлака на 1 кг смеси

$$G_{\text{шл}} = 0,53 \cdot g_{\text{изв}} + g_{\text{кшл}} \quad (2)$$

где $g_{\text{изв}}$ и $g_{\text{кшл}}$ – доли известняка и конвертерного шлака в смеси соответственно.

Следовательно,

$$G_{\text{шл}} = 0,53 + 0,47 \cdot g_{\text{кшл}} \quad (3)$$

т.е., с повышением доли конвертерного шлака в смеси общее количество шлака, который образуется, пропорционально возрастает.

С учетом химического состава известняка и конвертерного шлака, например, в условиях мартеновского цеха ПАО «ММК им. Ильича», при средней норме удельного расхода известняка 53 кг/т стали и заданной основности 1,9 первичного шлака из выражения (3) получим равенство

$$Y = 53 - 0,45 X, \quad (4)$$

где Y и X – соответственно удельный расход известняка и конвертерного шлака в смеси.

Расчеты с использованием выражения (4) показали, что удельный расход смеси возрастает, если в составе смеси повышается величина соотношения между конвертерным шлаком и известняком, что приводит к увеличению количества шлака, получаемого из смеси.

На рис. 1 приведена зависимость количества печного шлака, образующегося из смеси конвертерного шлака и известняка, и повышения его массы от расхода конвертерного шлака.

Чрезмерное увеличение доли конвертерного шлака в смеси приводит к значительному возрастанию массы печного шлака и, как следствие, повышению потерь металла и тепла со шлаком (рис. 1).

Согласно расчету, общее количество тепла, необходимого для нагрева смеси известняка с конвертерным шлаком, определяется в зависимости от соотношения их долей в смеси

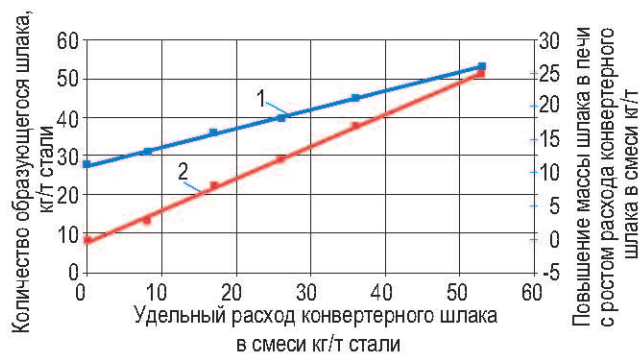


Рисунок 1 – Зависимость количества образующегося из смеси конвертерного шлака и известняка печного шлака (1) и повышения его массы (2) от расхода конвертерного шлака

$$Q_{\text{заг}} = 3964 - 2036 \cdot N_{\text{кшл}} \quad (5)$$

где $N_{\text{кшл}}$ – доля конвертерного шлака в смеси.

Зависимость количества шлака, получаемого из смеси известняка с конвертерным шлаком, и удельного расхода тепла на его нагрев от доли известняка в смеси приведена на рис. 2.

Анализ данных (рис. 2) свидетельствует, что рациональное соотношение известняка и конвертерного шлака в смеси находится в пределах 55–75 % относительно доли известняка.

Результаты расчетов и исследований опытно-промышленных партий плавок, проведенных в условиях ПАО «ММК им. Ильича», позволили разработать и внедрить рациональную технологию утилизации конвертерного шлака в крупных мартеновских печах [8]. В технологическую инструкцию «Выплавка стали, в том числе для экспорта и атомной энергетики, в мартеновском цехе» (ТИ 227-СТ.М-01-201) ОАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича» от 27.11.2002 г. внесено изменение № 2, предусматривающее сепарирование, просеивание до фракции не более 100 мм конвертерного шлака и задано соотношение масс конвертерного шлака и известняка в смеси, присаживаемой в завалку.

Для подготовки конвертерного шлака с целью утилизации его в мартеновских и доменных печах ПАО «ММК им. Ильича» работниками комбината было спроектировано и пущено в эксплуатацию отделение по переработке шлаков текущего производства и отвалных. Внедрение технологии утилизации конвертерного шлака в мартеновское производство в 2002 г. обеспечило снижение удельного расхода известняка в среднем на 10,5 кг/т стали. При этом в результате разложения 10,5 кг/т CaCO_3 в стехиометрическом соотношении выделяется углекислый газ в количестве $10,5 \cdot 44 / 100 = 4,62$ кг/т выплавленной стали. С учетом содержания CaCO_3 в известняке до 95 % количество выде-

ленного CO_2 составляет $4,62 \cdot 0,95 = 4,4$ кг/т, что соответствует уменьшению выбросов углекислого газа за счет экономии известняка. Экономический эффект от использования запатентованной авторами технологии в период действия патента (6 лет) превышал 1,5 млн грн в год.

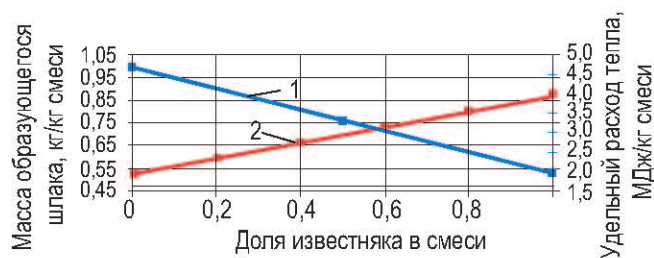


Рисунок 2 – Зависимость количества образующегося шлака (1) и удельного расхода тепла (2) на его нагрев от доли известняка в смеси

На основе анализа влияния удельного расхода сталеплавильных шлаков на содержание и соотношение главных компонентов аглошихты, которые обеспечивают заданные свойства агломерата, на ОАО «МК «Азовсталь» были разработаны составы смесей с использованием конвертерного и отвального шлаков для аглошихты и как составной части доменной шихты для промышленного испытания. Показано, что к преимуществам предложенного способа относятся снижение удельного расхода аглоруды и отсева известняка на 10 кг/т аглошихты каждого и площади отвала, чем компенсируется снижение содержания железа в аглошихте на 0,42–0,54 %.

Проведено опытно-промышленное испытание подготовки смеси шлаков доменного, конвертерного, отвального и из старых отвалов для доменной плавки и аглошихты, а также спекание опытной партии аглошихты с использованием смеси скрапа, полученной после отсева и отмагничивания шлаков. В связи с напряженной работой дробильно-сортировального узла, предназначенного для переработки доменных шлаков, целесообразно опытно-промышленное испытание подготовки разработанных составов аглошихты со сталеплавильными шлаками выполнять с использованием новой высокопродуктивной установки, что позволяет отмагничивать их и выделять из продукта фракцию 0–10 мм.

Следует заметить, что смеси скрапа, полученные после отсева и отмагничивания шлаков (доменного, конвертерного, конвертерного застывшего и отвального), имеют содержание оксидов железа значительно большее, чем конвертерные шлаки текущего производства, а основность – более низкую, и колеблются они в менее широких пределах: от 46,8 до 53,7 % и от 0,96 до 1,81 % соответственно.

Согласно расчетам, рациональный удельный расход смеси скрапа – около 20 кг/т агломерата, поэтому продолжительность опытно-промышленного спекания агломерата в цехе агломерации – 7 часов. Ввод в аглошихту смеси скрапа фракции 0–10 мм в количестве 2 кг на погонный метр транспортной ленты обеспечил удельный расход скрапа – 20 кг/т агломерата. За этот период производство опытного агломерата составило 1885 т, удельный расход скрапа – 37 т.

Установлено, что барабанная проба опытного агломерата выросла на 0,6 %, а количество мелочи под бункерами доменного цеха снизилось на 2 %, но из-за значительного колебания содержания железа и основности смеси скрапа имеют место случаи производства некондиции по основности. Для предотвращения этого нужна организация усреднения скрапа на участках погрузки и в штабелях, а также коррекция состава смеси при технологии извлечения металла из шлаков.

Промышленное испытание опытного состава аглошихты позволило оценить характер и степень влияния колебания химического состава отмагниченного продукта на технологичность спекания и качество агломерата, а также наметить направления усовершенствования технологии утилизации шлаков. Также проанализированы исследования по совершенствованию технологии переработки и использованию отвальных мартеновских шлаков при производстве агломерата и чугуна [9].

Оценка использования мартеновского шлака в аглодоменном производстве с точки зрения технологии не выявила негативных факторов. По физическим характеристикам мартеновский шлак фракций 0–20 и 20–60 мм не хуже аглоруды и агломерата, а по выходу мелочи фракция 20–60 мм мартеновского шлака значительно лучше, чем агломерат – при транспортировке этот материал почти не разрушается и способствует улучшению газораспределения в печи.

По химическим характеристикам шлак фракции 0–20 мм лучше аглоруды, поскольку является одновременно железорудным материалом и флюсом. При использовании в шихте мартеновского шлака не требуется дополнительной теплоты на разложение известняка и минералообразование, быстрее и легче образуется расплав, структура агломерата становится более однородной – это приводит к снижению расхода твердого топлива и повышению прочности агломерата. Наличие в мартеновском шлаке значительного количества металлического железа также способствует снижению расхода твердого топлива, поскольку при его окислении выделяется тепло. Экономия твердого топлива при введении в шихту 1 кг металлического железа составляет 0,2–0,3 кг.



При введении в аглошихту мартеновского шлака в агломерате повышается содержание оксидов магния и марганца, что способствует улучшению шлакового режима в доменной плавке и снижению содержания серы в чугуне. Проведенные испытания не выявили серьезных факторов, ограничивающих расход мартеновского шлака в аглошихту.

В результате системных действий, направленных на снижение регуляторной и фискальной нагрузки на сегмент вторичного ресурсопользования, специалистами департамента УкрМет совместно с профильными комитетами Верховной Рады Украины проведены рабочие встречи и консультации с международными экспертами, практикующими в данной области. Такой подход, связанный с приданием новой трактовки определенному перечню ресурсопользуемых материалов объектно-экономической деятельности, заинтересовал зарубежных экспертов.

Результатом таких встреч и переговоров явилось принятие Европарламентом директивы 2008/98/ЕС, в которой (ст. 5) впервые приведены такие определения, как «побочная продукция» и даются разъяснения по поводу того, что можно считать побочной продукцией – в частности, к ней могут относиться материалы и вещества, которые являются интегральной составляющей основного технологического процесса. В металлургических процессах такими материалами являются шлаки, шламы, графитированные материалы и др. Указанный подход способствует формированию в Украине, а также в международном экономическом пространстве рыночно-хозяйственных отношений в сфере вторичного ресурсопользования и приданию динамики вовлечения в хозяйственный оборот вторичных ресурсов как дополнительных источников сырья и энергии техногенного происхождения. В ст. 5 прописаны также условия, при которых вещества и материалы считаются не «отходами», а «побочной продукцией».

Директива также делает акцент на усилении экономических механизмов вторичного ресурсопользования, а в ст. 11 (пункт 1) рекомендуется странам ЕС активнее применять экономические механизмы стимулирования вторичного ресурсопользования. С учетом изложенного, а также в соответствии с положениями Закона Украины «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо відходів» от 07.03.2002 № 3073-III (ст. 4, часть 2) и его конечных положений, предписывающих создание отдельных правовых актов с целью стимулирования в сфере обращения с вторичными материальными ресурсами, Департаментом вторичных ресурсов УкрМет совместно с народными депутатами от профильных комитетов Верховной Рады разработан проект Закона Украины о вторичных материальных ресурсах, побочной продукции и их рециклинге.

Следует также отметить, что в Верховной Раде шестого созыва по инициативе руководства УкрМет и народных депутатов от промышленных комитетов принят Закон Украины «Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо удосконалення деяких податкових норм» от 24.05.12 № 4834-17, освобождающий предприятия от экологических платежей (штрафов) за размещение вторичного сырья в специально отведенных для этого местах с целью последующей обработки и реализации потребителям.

Эти меры позволяют уменьшить фискальную нагрузку на промышленный сектор экономики Украины, тем самым способствуя увеличению конкурентной способности продукции на внешних рынках и улучшению экологической обстановки.

ВЫВОДЫ

Одним из наиболее доступных способов улучшения экономических и экологических показателей металлургического производства в настоящее время является использование внутренних резервов путем повышения доли вторичных материальных ресурсов, в частности шлаков, в технологических процессах взамен природного сырья по принципу рециклинга.

Важная и актуальная задача отечественной металлургии – снижение выбросов углекислого газа и потерь тепла в окружающую среду. Расчеты показали, что использование конвертерного шлака в качестве шихтового материала доменной и мартеновской плавки обеспечивает снижение выделений углекислого газа в количестве 0,4 кг на 1 кг сэкономленного известняка.

Применение рациональной технологии утилизации конвертерного шлака в мартеновских печах в условиях ПАО «ММК им. Ильича» обеспечивает снижение расхода известняка в количестве до 10,5 кг, выхода шлака до 9 кг и выделения углекислого газа до 4,4 кг на тонну стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Алешин, А.А.** Эколого-экономические и нормативно-правовые аспекты обращения с вторичными ресурсами и побочными продуктами в промышленности / А.А. Алешин, Е.А. Казачков, А.В. Остроушко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. – 2006. – Вип. № 16. – С. 250–255.
2. **Остроушко, А.В.** Эколого-экономические и нормативно-правовые аспекты обращения с вторичными ресурсами и побочными продуктами в промышленности / А.В. Остроушко, А.А. Алешин, Л.И. Тарасюк // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. – 2009. – Вип. № 19. – С. 296–300.

3. Закон України «Про ратифікацію Кіотського протоколу до Рамкової Конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1430-15>.
4. **Шестопапов, И.И.** Использование конвертерных шлаков в доменном производстве / И.И. Шестопапов, Г.А. Петров, Г.М. Верцман и др. // *Металлург.* – 1990. – № 12. – С. 37–38.
5. **Курбацкий, М.Н.** Использование шлаков металлургического производства / М.Н. Курбацкий, Т.А. Курган, Н.С. Игнатьева // *Сталь.* – 1992. – № 12. – С. 73–74.
6. **Тарабрина, Л.А.** Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК» / Л.А. Тарабрина, Т.А. Курган, Н.С. Игнатьева // *Металлург.* – 2000. – № 9. – С. 26–27.
7. **Товаровский, И.Г.** Пути повышения эффективности использования конвертерных шлаков в доменной плавке / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк и др. // *Сталь.* – 2003. – № 4. – С. 17–20.
8. Патент № 53501 Україна. МПК С21С5/04. Спосіб виплавки сталі в основній мартенівській печі / Бойко В.С., Лещенко Є.Н., Кліманчук В.В. та ін.; заявник і власник ВАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча». – № 2002065020; заявл. 18.06.02; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1. – 8 с.
9. **Бондарь, А.А.** Использование мартеновского шлака в агломерационном и доменном процессах / А.А. Бондарь, В.В. Павлов, Г.М. Гуляев и др. // *Сталь.* – 1995. – № 10. – С. 5–8.

Поступила в редакцию 15.04.2012

Приведено аналіз проблеми використання металургійних шлаків шляхом підвищення їх частки у технологічних процесах замість природної сировини за принципом рециклінгу. У результаті дослідження встановлено раціональне співвідношення частки конвертерного шлаку в суміші з вапняком, що забезпечує утилізацію конвертерного шлаку в мартенівській плавці, зниження питомих витрат вапняку на 10,5 кг/т і викидів в атмосферу вуглекислого газу на 4,2 кг/т сталі відповідно. Показано доцільність застосування в агломерационному виробництві мартенівського шлаку фракцій 0–20 і 20–60 мм.

Issue of metallurgical slag use by increasing its part in technological processes instead of natural resources on the principle of recycling is analyzed. In the result of investigation it is found out the balance ratio of converter slag mixed with limestone, providing recycling of converter slag in the open-hearth smelting, reducing specific consumption of limestone to 10.5 kg/t and carbon dioxide emissions by 4.2 kg/ton, respectively. Expediency of using in sinter and blast-furnace production of open-hearth slag with fractions 0-20 and 20-60 mm is shown.