

А.Я. Бабанин /д.т.н./

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (Макеевка)

Б.Ф. Белов /к.т.н./, А.Я. Минц, И.А. Абакумов

ГП «Юзовский металлургический завод» (Донецк)

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ПОЛУПРОДУКТА В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ИЗ МЕТАЛЛОШИХТЫ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОКИСЛОВ ЖЕЛЕЗА

На основании проведенных исследований разработана технология ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи для переработки металлической шихты с повышенным содержанием окислов железа. Предложен механизм формирования печного шлака с высокой рафинировочной способностью, а также механизм его рафинировочных действий на основе структурно-химического состояния основных компонентов шлака и их сегрегаций. Предложенный механизм позволяет управлять процессом формирования активированного печного шлака и значительно повысить его рафинирующее действие.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, металлическая шихта, окислы железа.

Постановка проблемы

Региональные мини-металлургические предприятия, построенные для переработки скопившегося металлического лома, работают, как правило, в сложных производственных условиях и имеют ряд особенностей, основными из которых являются:

– работа дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на металлической шихте с повышенным содержанием окислов железа;

– ведение технологического процесса плавки с дефицитом необходимых шлакообразующих материалов, десульфураторов и флюсов.

Это в совокупности сопровождается увеличением длительности плавки и приводит к значительному повышению себестоимости производимой металлопродукции. К таким заводам следует отнести мини-металлургические предприятия, находящиеся в отдаленных районах России, а также в Донецкой Народной Республике.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ публикаций, направленных на решение данной проблемы, свидетельствует о некоторых теоретических проработках ее решения [1]. Известно, что основу образующегося в ДСП шлака при работе на металлошихте с повышенным содержанием окислов железа составляют высокожелезистые силикаты кальция. Именно окислы железа определяют степень окисленности шлака и значительно снижают его рафинировочную способность к удалению серы [2,3].

Теоретически установлено, что в процессе плавки продукты протекающих реакций окисления и присаживаемые шлакообразующие вступают во взаимодействие с образованием промежуточных фаз (силикаты кальция, вюстит-фазы), а соотношение в них компонентов определяется по диаграмме состояния FeO-SiO₂-CaO [4].

Следует отметить, что выше представленные теоретические разработки являются основой для практического решения поставленной задачи, в частности, для разработки оптимальной технологии выплавки полупродукта в ДСП при высоком содержании окислов железа в металлошихте и при ресурсосбережении дорогостоящих шлакообразующих материалов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи с учетом высокого содержания окислов железа в металлической шихте для снижения затрат на дорогостоящие рафинировочные шлаковые смеси и флюсы.

Основной материал исследования

Представленные в данной работе результаты были получены в процессе проведения исследований на ГП «Юзовский металлургический завод». Выплавку стали марок СтЗсп и Ст4сп проводили в соответствии с действующей технологической инструкцией выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи ДСП-2 емкостью 120 тонн системы Danark и с дальнейшей внепечной доводкой металла на установке «ковш-печь».

Особенностью исследуемых промышленных плавок является применение в завалку металлического лома с высоким содержанием окислов железа и чугунного скрапа («козлы» шлаковых чаш и чугуновозных ковшей), загрязненного в дополнение к окислам железа еще и доменным шлаком. Это значительно ухудшало эффективность десульфурации стали в печи и приводило к сложностям получения заданного марочного содержания серы в готовом металле, а следовательно, к дополнительным затратам по доводке металла на установке «ковш-печь».

Результаты исследования шлакового режима серии промышленных плавок с повышенным содержанием окислов железа в металлошихте, выполненного по пробам металла, отобранным из печи в период плавления, представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных по 11-ти серийным промышленным плавкам свидетельствует о том, что содержание окислов железа в печном шлаке значительно превышает технологические нормы ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи. Среднее значение содержания окислов железа находится на уровне 37,0 %, а поплавочное содержание окислов железа в шлаке изменяется в диапазоне от 32,1 до 45,2 %.

По визуальным наблюдениям, такой печной шлак очень жидкоподвижен, не вспенивается, и дуговая сталеплавильная печь работает в режиме открытых дуг. Существенным недостатком режима работы открытых дуг являются значительные потери тепла от дуг в атмосферу печи, что

ухудшает нагрев металла и, следовательно, увеличивает длительность плавки и окисленность металла от его взаимодействия с перекисленным шлаком и взаимодействия его открытой поверхности с кислородом атмосферы печи. Кроме того, такие высокожелезистые шлаки характеризуются низкой рафинировочной способностью, в частности, к удалению серы из металла. Содержание основных компонентов CaO-SiO₂-Al₂O₃ в пересчете на трехкомпонентную систему составляет соответственно, %: 50,98-38,01-10,72.

На основании проведенных исследований, для улучшения физических свойств печного шлака, в частности, снижения жидкотекучести и улучшения способности к вспениванию, а также к активизации рафинировочных процессов в дуговой сталеплавильной печи при работе на шихтовых материалах с высоким содержанием окислов железа разработана технология ведения плавки, которая включает следующие операции:

- присадка по ходу плавки кусковых шлакообразующих материалов;
- раскисление шлака по ходу плавки присадкой кусковых углеродсодержащих материалов фракцией 10...50 мм;
- присадка углеродсодержащих материалов осуществляется через 2...3 мин после подачи шлакообразующих в область их присадки;
- количество присаживаемых углеродсодержащих материалов определяется с учетом массы печного шлака и содержания в нем окислов железа из расчета обеспечения в шлаке их содержания на уровне 3...5 %.

Табл. 1. Параметры шлакового режима печи ДСП-2 системы Danark емкостью 120 т при работе на металлошихте с высоким содержанием окислов железа

| Содержание компонентов, % | | | | | | Основность шлака, CaO+MgO SiO ₂ , ед. |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|-----------|--|
| Диапазон содержания компонентов, % | | | | | | |
| SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | MnO | FeO | |
| 15,5 | 20,63 | 4,34 | 5,54 | 5,63 | 36,91 | 1,74 |
| 13,3-21,4 | 18,4-33,1 | 3,2-6,1 | 1,5-8,3 | 4,6-7,4 | 32,1-45,2 | 1,58-2,96 |

Табл. 2. Стехиометрические и структурные формулы, параметры СИМ-комплексов силикатов кальция [4,5]

| № п/п | Формульный состав | | СИМ-комплексы |
|-------|-----------------------|--|---|
| | Стехиометрический | Структурный | Геометрические параметры полигональных ячеек: $a=0,20$ нм, $b=0,153$ нм, $h=0,12$ нм |
| 1 | 2CaOSiO ₂ | Ca ₂ Si ₁ O ₄ $N=7, L=0,44$ $S_o=0,0126$ | |
| 2 | 6CaO2SiO ₂ | Ca ₆ Si ₂ O ₁₀ $N=18, L=1,252$ $S_o=0,0131$ | |

где N – количество частиц; L – длина (нм); S_o – относительная плотность упаковки.

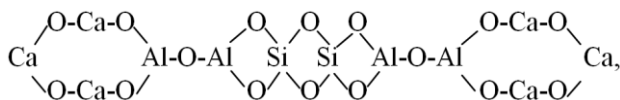
При содержании в печном шлаке данного химического состава 3...5 % окислов железа его основу составляют силикаты кальция. В зависимости от содержания окислов кальция и кремния возможно образование силикатов кальция двух типов. Стехиометрические и структурные формулы данных типов силикатов кальция, а также параметры их СИМ-комплексов представлены в табл. 2.

Однако наряду с тем, что печной шлак содержит окислы алюминия, при данном их содержании, в шлаке будут формироваться сегрегации из алюмосиликатов кальция [4,6].

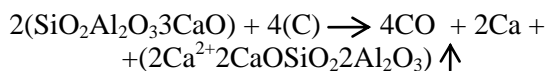
Структурная формула алюмосиликатов кальция имеет вид:



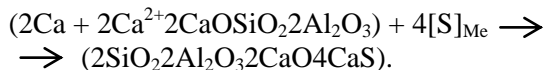
и соответствует СИМ-комплексу:



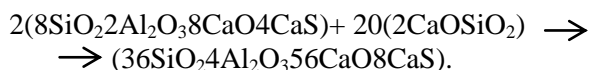
который в активированном состоянии после раскисления углеродом по реакции:



способен адсорбировать серу из металла в печной шлак по реакции:



Расход присадочных материалов регламентируется степенью рафинирования при заданном марочном составе стали. Печной шлак преимущественно $V_0 \leq 2,0$, отвечающий составу основных компонентов ортосиликата кальция (2CaOSiO_2), ассимилирует находящиеся в металле окислы в виде неметаллических включений с образованием в печном шлаке химических сегрегаций по реакции:



Печной шлак в количестве 6,3 кг/т содержит (масс. %): $34,4\text{SiO}_2 + 6,5\text{Al}_2\text{O}_3 + 49,9\text{CaO} + 9,2\text{CaS}$ при $V_0=1,45$, $B=1,72$, $M=1,45$, адсорбционная емкость по сере $A_S=4,1$ %, адсорбционная емкость по кислороду, $A_O=14,3$ %, степень эвтектичности, $\eta_3=96,4$ % ($41,4$ % $12\text{SiO}_2\text{4Al}_2\text{O}_3\text{16CaO8CaS}$ (Э_1)+ $55,0$ % $24\text{SiO}_2\text{36CaO}$ (Э_2)), температура ликвидуса, рассчитанная аддитивно по температурам плавления Э_1 и Э_2 , составляет $T_{\text{л}} \sim 1350$ °C [4,7].

Известные модели управления процессами рафинирования стали [8,9], в которых адсорбционную емкость шлаков оценивают по термодинамическим характеристикам печного шлака с учетом химического состава, поверхностного натяжения, работы адгезии и когезии, не учитывают влияние структурно-химического состояния неметаллических фаз и являются очень сложными.

Структурно-химическое состояние печного шлака определяет природу физической или химической сорбции компонентов с образованием гетерогенного или гомогенного рафинировочного шлака, соответственно. Гетерогенные шлаки представляют собой взвесь твердых и жидких компонентов или эмульсию жидких компонентов, химически не связанных между собой отдельных сегрегаций, которые конвективными потоками увлекаются в объем жидкого металла. Гомогенные печные шлаки на поверхности металлического расплава являются жидкоподвижными ассоциированными растворами, химически и структурно связанными между собой компонентами полимерных фаз, устойчивых к разрушению при конвективном перемешивании. Гомогенные печные шлаки отличаются повышенной сорбционной емкостью, которая становится максимальной при подобии химического состава и структуры ионно-молекулярных комплексов шлака и неметаллических включений. Кроме того, сорбционная емкость рафинировочного шлака к примесным элементам в стали (кислород, сера и др.) повышается для активированного состояния, когда освобождаются химические связи оксидных компонентов шлака за счет его раскисления и образования новых химических связей с кислородом и серой, растворенных в металле.

Выводы

На основании проведенных исследований разработана технология ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи для переработки металлической шихты с повышенным содержанием окислов железа. Предложен механизм формирования печного шлака с высокой рафинировочной способностью, а также механизм его рафинировочных действий на основе структурно-химического состояния основных компонентов шлака и их сегрегаций. Предложенный механизм позволяет управлять процессом формирования активированного печного шлака и значительно повысить его рафинирующее действие. Кроме того, позволяет прогнозировать и оптимизировать технологические параметры рафинирования стали в зависимости от состава металла, шлака и типа присадочных материалов (шлакообразующие, твердые шлакообразующие смеси, флюсы).

Список литературы

1. Зайцев, А.И. Физическая химия металлургических шлаков / А.И.Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов. – М.: Наука, 2008. – 352 с.
2. Development of fluoride-free fluxes for billet casting / A.V. Fox et al. // *SIJ Int.* – 2005. – No.7. – P. 1051-1058.
3. A model for the silicon-manganese deoxidation of steel weld metals / O.Grong [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions.* – 1986. – Vol.17. – P. 1797-1807.
4. Полигональная диаграмма состояния тройной системы FeO-SiO₂-CaO // Б.Ф.Белов [и др.] // *Процессы литья.* – 2006. – №4. – С. 18-22.
5. Классификация и структуризация силикатов кальция /А.Я. Бабанин [и др.] // *Вестник ДонНТУ.* – 2020. – №1(19). – С. 53-58.
6. Бабанин, А.Я. Наноструктурный анализ механизма образования неметаллических включений при ковшевой обработке стали сплавами ферросиликоалюминий и силикокальций /А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, В.В. Белоусов // *Электрометаллургия.* – 2018. – №8. – С. 30-38.
7. Обработка железоуглеродистых расплавов высокоактивными реагентами: Монография / А.Я. Бабанин [и др.]. – Донецк: Восточный издательский дом, 2015. – 219 с.
8. Шахпазов, Е.Х. Модели управления процессами ковшевой обработки стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, Н.Г. Радионова // *Металлург.* – 2008. – №6. – С. 30-35.
9. Innovatory Technology of Direct Steel Alloying and Ways of its Development / G. Jandieri [et al.] // *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences.* – 2011. – No.1. Vol.5. – P. 84-88.

A.Ya. Babanin /Dr. Sci. (Eng.)/

Donbas National Academy of Construction and Architecture (Makeyevka)

B.F. Belov /Cand. Sci. (Eng.)/, A.Ya. Mints, I.A. Abakumov

Yuzovsky Metallurgical Plant (Donetsk)

THE TECHNOLOGY OF SMELTING SEMI-PRODUCT OF METAL CHARGE WITH HIGH CONTENT OF IRON OXIDES IN AN ARC STEEL-MELTING FURNACE

Background. *The main features of the work of regional mini-metallurgical enterprises, built to process the accumulated metal scrap and provide the region with the necessary metal products, are the operation of an electric arc furnace on a metal charge with increased content of iron oxides and smelting with a shortage of the necessary slag-forming materials, desulfurizers and fluxes. This leads to an increase in the melting duration and a significant increase in the cost of metal products.*

Materials and/or methods. *The studies were carried out under industrial conditions at the State Enterprise «Yuzovsky Metallurgical Plant». Smelting of steel grades St3sp and St4sp was carried out following the current technological instructions for the smelting of semi-finished products in an arc steelmaking furnace DSP-2 with a capacity of 120 tons of the Danark system and with further out-of-furnace finishing of the metal on the ladle-furnace unit. The determination of the mechanism of the refining action of the furnace slag was carried out based on the analysis of the structural-chemical state of the main components of the slag and their segregations.*

Results. *The results obtained indicate that the content of iron oxides in the furnace slag significantly exceeds the technological standards for conducting melting in an arc steel-making furnace. The average value of iron oxides' content is at the level of 37.0 %, and the floating content of iron oxides in the slag varies in the range from 32.1 to 45.2 %. The furnace slag is very fluid, does not foam and the steel arc furnace operates in open arc mode. Such high-iron slags are characterized by low refining ability, in particular, to remove sulfur from metal. The content of the main components CaO-SiO₂-Al₂O₃ in terms of the three-component system is, respectively, %: 50.98-38.01-10.72. The developed technology of smelting includes the following operations: additives during smelting of lumpy slag-forming materials; slag deoxidation during the melting process by adding lump carbon-containing materials with a fraction of 10...50 mm; the addition of carbon-containing materials is carried out 2...3 minutes after the supply of slag-forming materials to the area of their additive; the amount of carbon-containing materials to be added is determined taking into account the mass of the furnace slag and the content of iron oxides in it based on the provision of their content in the slag at the level of 3...5 %.*

Conclusion. *Technology has been developed to conduct melting in an arc steel-making furnace for processing a metal charge with increased iron oxides. A mechanism for forming furnace slag with a high refining capacity and a mechanism for its refining action, based on the structural-chemical state*

of the main components of the slag and their segregations, is proposed. The proposed mechanism allows control of activated furnace slag formation and significantly increases its refining effect and predicts and optimises the technological parameters of steel refining depending on the composition of the metal, slag, and type of filler materials.

Keywords: arc steel furnace, metal charge, iron oxides.

Сведения об авторах

А.Я. Бабанин

Author ID: 25928278900
Телефон: +380 (71) 358-59-50
Эл. почта: bay1957@mail.ua

Б.Ф. Белов

Телефон: +380 (71) 478-47-65
Эл. почта: belosvet@mail.ru

А.Я. Минц

Телефон: +380 (71) 391-85-91
Эл. почта: minc@istil.com.ua

И.А. Абакумов

Телефон: +380 (71) 426-50-47
Эл. почта: vanekweird@mail.ru

Статья поступила 26.11.2020 г.

© А.Я. Бабанин, Б.Ф. Белов, А.Я. Минц, И.А. Абакумов, 2020

Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров

