

Е.Н.Сигарев, И.В.Чернятевич // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1-2. – С.31-38.

4. Разработка и внедрение технологии горячего ремонта футеровки 160-т конвертеров с использованием вращающейся гарнисажной фурмы / А.Г.Чернятевич, В.А.Шеремет, Е.Н.Сигарев[и др.] // Бюллетень «Черная металлургия».– ОАО «Черметинформация». – 2008. – №11. – С.88-90.

Поступила в редколлегию 07.06.2012.

УДК 669.162.267

СИГАРЕВ Е.Н., к.т.н, доцент

Днепродзержинский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ШЛАКА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО РАФИНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО РАСПЛАВА

Введение. Наряду с неоспоримыми преимуществами (одностадийность и атермичность процесса) в сравнении с известными [1-3] отработанные в лабораторных условиях [4, 5] способы одновременного удаления серы и кремния из чугуна вдуванием топливно-кислородных и кислородно-известковых струй через погружные фурмы имеют ряд недостатков при реализации в промышленных условиях:

- изготовление и применение шлакоразделительных перегородок, сложность обслуживания двухкамерных заливочных ковшей;

- использование дорогостоящих порошкообразного алюминия в составе десульфурирующей смеси на основе извести и природного газа для создания кольцевой защитной оболочки вокруг кислородно-известковой струи, что снижает экономическую эффективность операции;

- расслоение и изменение состава предварительно подготовленной десульфурирующей смеси (90%CaO+10%Al) в процессе хранения и транспортировки, что осложняет получение стабильных показателей рафинирования чугуна;

- пожаро- и взрывоопасный режим работы инжекционного оборудования, особенно погружной фурмы из-за вдувания порошкообразной смеси, содержащей алюминий, в потоке кислорода.

С учетом возможной модернизации приобретенных рядом металлургических предприятий Украины коинжекционных установок десульфурации чугуна [6] и предложенной заменой порошкообразного алюминия на более дешевый и безопасный чушковый, а защитного природного газа на азот одновременное удаление кремния и серы в обычном заливочном ковше предлагается осуществлять по схеме (рис.1) [7]:

- производится первоначальная обработка железоуглеродистого расплава в заливочном ковше присадкой чушкового алюминия во время наполнения ковша расплавом;

- последующее вдувание порошкообразных десульфураторов вглубь расплава через две погружные фурмы, которые связаны с двумя работающими независимо одна от другой моно- или коинжекционными системами подачи порошков;

- через одну погружную фурму (типа «труба в трубе») производится вдувание в расплав порошкообразной извести в потоке кислорода, окруженного защитной кольцевой оболочкой азота, с удалением кремния в пределах первичной реакционной зоны воздействия кислородно-известковых струй на расплав, а серы – во вторичной барботажной реакционной зоне посредством взаимодействия с всплывающими к поверхности ванны каплями жидкоподвижного шлака системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO);

- путем подачи диспергированного магния или смеси последнего с известью в

потоке азота через вторую погружную фурму обеспечивается формирование обособленной реакционной зоны преимущественного удаления серы из расплава;

- с целью поддержания необходимой концентрации оксида алюминия в шлаке системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO) в зону нисходящих потоков расплава по ходу обработки производится ввод алюминиевой катанки с помощью трайб-аппарата;

- на окончательной стадии обработки, когда содержание серы становится ниже критических значений (0,01%), осуществляется вдувание только извести, а подача диспергированного магния прекращается с целью сокращения его потерь на растворение в расплаве.

Постановка задачи. Оптимизация химического состава и свойств шлака, формируемого в пределах обособленной реакционной зоны обескремнивания и десульфурации (рис.1), с обеспечением его жидкоподвижности, повышенной сульфидной емкости, высокого поверхностного и пониженного межфазного натяжения является одним из условий достижения высоких показателей предложенного способа [7].

В системе CaO-Al₂O₃ имеются два соединения в виде квазимолекул 5CaO-3Al₂O₃ и CaO-Al₂O₃ [8], плавящихся конгруэнтно при небольшом перегреве по отношению к температуре плавления шлака. В то же время, при повышенном содержании [S] образующийся CaS_{тв} способен обволакивать включения Al₂O₃, препятствуя их дальнейшему взаимодействию с CaO, что свидетельствует в пользу обоснованности предложенного ввода алюминия в расплав по ходу рафинирования.

Мнения о влиянии SiO₂ на величину поверхностного натяжения и вязкость шлаков неоднозначны. Так, согласно [9] поверхностное натяжение шлаков в системе (CaO-SiO₂-Al₂O₃) в пределах содержания CaO (35-50%) и SiO₂ (15-35%) практически не изменяется и составляет более 500 МДж/м², что обеспечивает хорошее отделение королек металла от шлака и снижение потерь расплава со скачиваемым шлаком. В соответствии с [10] повышение (SiO₂) (от 10 до 30 вес.%) в шлаках системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃) приводит к снижению поверхностного натяжения.

Сложное влияние добавок (SiO₂) на вязкость известково-глиноземистых шлаков отмечено в работе [11]. Вязкость шлаков в системах (CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO) с содержанием SiO₂ в пределах 35-45% по мере повышения концентрации остальных компонентов может снижаться до 0,2 Па·с [8]. В соответствии с расчетами при увеличении поверхностного натяжения от 300 до 500 мДж/м² средний радиус шлаковых капель (*r*) в расплаве уменьшается с 1,4·10⁻⁴ до 0,85·10⁻⁴ м (в 1,65 раза), а при повышении вязкости шлака от 0,05 до 0,15 Па·с увеличение *r* составляет 14%. Поддержание SiO₂ в системе (CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO) в пределах (30-35%), по-видимому, должно способствовать как повышению поверхностного натяжения шлака, так и полноте удаления серы из расплава.

Эффективность процессов в обособленной реакционной зоне (рис.1) одновременного обескремнивания и десульфурации расплава [7] может быть обеспечена:

- согласованием скорости процессов окисления кремния расплава и растворенного алюминия, восстановления (FeO) и удаления серы в пределах *I*_{р.з.} и *II*_{р.з.} с максимальной степенью усвоения вдуваемого кислорода и извести;

- диспергированием формирующихся в пределах реакционных зон и всплывающих к поверхности ванны капель десульфурующего шлака с уменьшением их радиуса и повышением площади межфазного взаимодействия;

- формированием слоя покровного шлака системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO) с высокой сульфидной емкостью, пониженным межфазным и высоким поверхностным натяжением.

Результаты работы. На основании результатов анализа химического состава покровных шлаков, отобранных в серии экспериментов (табл.1) по отработке различных способов раздельного и совместного обескремнивания и десульфурации железоуг-

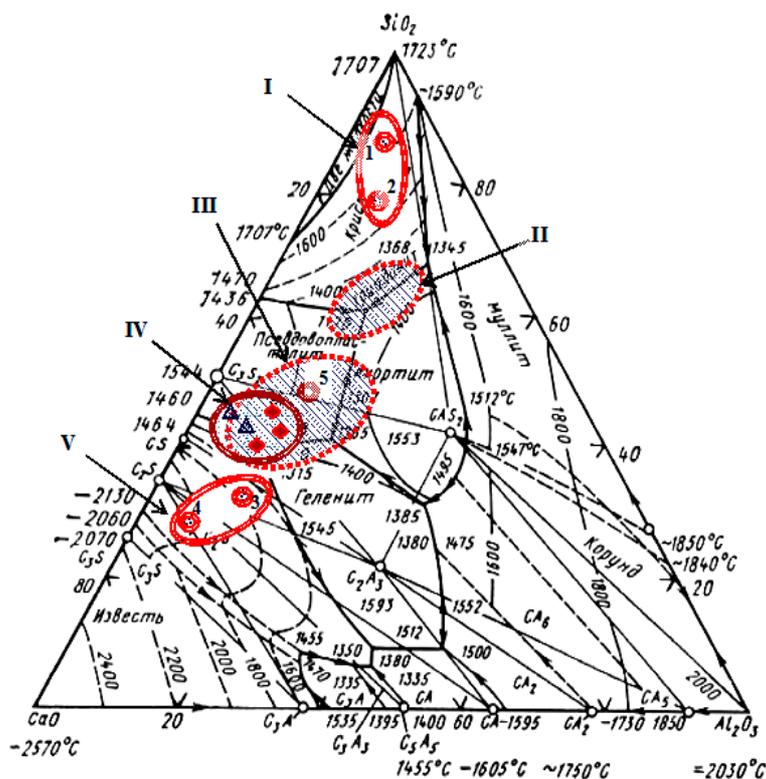
леродистого расплава (табл.2) [5, 7 и др.] с отображением средних значений содержания компонентов шлака в виде точек на диаграмме состояния системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃) (рис.2) можно отметить следующее.

Таблица 2 – Изменение химического состава неметаллической части покровных шлаков

№ вар	Общая характеристика способа рафинирования, количество погружных фурм	Компоненты шлака, % (диапазон/среднее значение)						
		CaO	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	S
1.	Продувка расплава кислородными струями в оболочке природного газа, 1	$\frac{6,8-13,4}{10,1}$	$\frac{65,5-73,3}{69,4}$	$\frac{7,8-20,1}{13,9}$	$\frac{5,0-8,7}{6,9}$	$\frac{2,1-8,6}{5,4}$	$\frac{2,32-3,31}{2,8}$	$\frac{0,01-0,015}{0,013}$
2.	Вдувание диспергированного Mg в потоке азота, 1	$\frac{11,0-15,6}{13,3}$	$\frac{58,0-63,2}{60,6}$	$\frac{6,3-24,5}{15,4}$	$\frac{1,0-5,4}{3,2}$	$\frac{2,3-9,5}{5,9}$	$\frac{0,41-0,84}{0,63}$	$\frac{2,11-5,73}{3,92}$
3.	Вдувание порошкообразной смеси (9:1) CaO _{дол} и Al в потоке кислорода в оболочке природного газа, 1	$\frac{43,3-46,8}{45,1}$	$\frac{20,4-28,2}{24,3}$	$\frac{8,8-9,9}{9,4}$	$\frac{5,0-10,7}{7,9}$	$\frac{8,8-12,6}{10,7}$	$\frac{0,42-0,63}{0,53}$	$\frac{0,71-0,94}{0,83}$
4.	Вдувание порошкообразной смеси (8,5:1,5) CaO и Al в потоке азота, 1	$\frac{45,0-53,2}{49,1}$	$\frac{10,3-30,2}{20,3}$	$\frac{4,3-10,4}{7,3}$	$\frac{0,6-3,6}{2,4}$	$\frac{6,7-12,4}{9,6}$	$\frac{0,22-0,51}{0,37}$	$\frac{0,71-1,42}{1,10}$
5.	* Вдувание смеси (9:1) CaO и Al в потоке кислорода в оболочке азота, 1	$\frac{32,5-47,9}{40,2}$	$\frac{38,7-53,1}{45,9}$	$\frac{5,3-7,2}{6,3}$	$\frac{4,3-5,8}{5,1}$	$\frac{6,4-12,3}{9,4}$	$\frac{0,15-0,23}{0,19}$	$\frac{1,22-1,91}{1,57}$
6.	* Вдувание CaO в потоке кислорода и Mg в потоке азота, 2	$\frac{35,4-47,8}{41,6}$	$\frac{24,1-35,8}{29,9}$	$\frac{3,1-4,9}{4,0}$	$\frac{0,7-1,2}{0,9}$	$\frac{10,5-12,3}{11,4}$	$\frac{0,12-0,15}{0,14}$	$\frac{1,86-2,17}{2,02}$
7.	* Вдувание CaO _{дол} в потоке кислорода в оболочке азота, 1	$\frac{38,3-42,8}{40,6}$	$\frac{28,4-38,2}{33,3}$	$\frac{6,5-8,9}{7,7}$	$\frac{1,8-2,6}{2,2}$	$\frac{6,8-9,6}{8,2}$	$\frac{0,35-0,48}{0,42}$	$\frac{0,69-1,16}{0,93}$
8.	* Вдувание CaO _{дол} в потоке кислорода в оболочке азота и Mg в потоке азота, 2	$\frac{38,4-42,6}{40,5}$	$\frac{31,4-33,6}{32,5}$	$\frac{8,2-10,0}{9,6}$	$\frac{0,9-1,3}{1,1}$	$\frac{9,4-10,2}{9,8}$	$\frac{0,18-0,20}{0,19}$	$\frac{1,22-1,42}{1,32}$
9.	* Вдувание CaO _{дол} в потоке кислорода в оболочке азота и смеси (3,5:1) CaO _{дол} с Mg в потоке азота с вводом алюминия по ходу обработки, 2	$\frac{42,0-46,2}{44,1}$	$\frac{31,4-35,0}{33,2}$	$\frac{9,6-10,6}{10,2}$	$\frac{0,6-1,0}{0,8}$	$\frac{12,0-13,6}{12,8}$	$\frac{0,18-0,21}{0,20}$	$\frac{1,36-1,60}{1,48}$
10.	* Вдувание CaO _{дол} в потоке кислорода в оболочке азота с вводом алюминия по ходу обработки, 1	$\frac{42,9-45,0}{43,9}$	$\frac{29,4-35,4}{32,4}$	$\frac{6,7-7,4}{7,1}$	$\frac{0,8-1,12}{0,96}$	$\frac{10,5-13,2}{11,9}$	$\frac{0,14-0,21}{0,18}$	$\frac{1,21-1,40}{1,30}$

* - расплав, предварительно раскисленный присадкой чушкового алюминия

В соответствии с предложенной физико-химической моделью процессов (рис.1) и согласно [8] при вдувании извести вглубь расплава в потоке кислорода на границе первичной реакционной зоны (I р.з.) массообмен CaO между вдуваемой известью и высокоокисленным силикатным шлаком протекает пропорционально определенной концентрации CaO^* . В нижних горизонтах ванны на границе с I р.з. первоначально формируются капли шлака, содержащие более 20% $(\text{FeO}+\text{MnO})$ с пониженным межфазным натяжением на границе с металлом, обеспечивающие высокую интенсивность массообменных процессов. В области нарастания концентрации CaO^* с переходом от $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (1544°C) к $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (2130°C) (рис.2) и повышением основности шлака до 1,0-1,5, в средних по высоте ванны горизонтах II р.з. максимизируется ν_{FeO} , что при наличии во всплывающих каплях шлака $\text{CaO}_{\text{шф}}$ и $a_{\text{FeO}}=0,3-0,4$ минимизирует (FeO) . Освободившийся кислород расходуется на окисление примесей расплава (Si, Mn, C, P) и растворенного алюминия. С повышением вязкости шлака по мере насыщения его вдуваемой CaO скорость растворения извести уменьшается, пока основность не достигнет 1,87 и шлак не войдет в область $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (область V, рис.2).



Номера у точек в соответствии с вариантом рафинирования расплава (табл.2).
 В области IV состав шлаков соответствует вариантам №№ 6-10

Рисунок 2 – Состав шлаков, сформированных в пределах вторичной реакционной зоны при отработке различных вариантов удаления кремния и серы из железоуглеродистого расплава (табл.2).

Несмотря на то, что в шлаковых расплавах системы $(\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO})$ наиболее легкоплавкие составы шлаков расположены в области II [12] (рис.1), при таких составах относительно небольшие изменения концентрации компонентов в шлаке сопровождаются резким повышением температуры ликвидуса. Кроме того, при температурах ковшевой обработки чугуна шлаковые расплавы этой области имеют относительно высокую вязкость ($>2,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

При повышенной, в сравнении с областью II, температуре плавления шлаков области III (рис.2), здесь изменения концентрации компонентов не приводят к резким колебаниям температуры кристаллизации. Расплавы этой области отличаются пониженной вязкостью (0,3-0,5 Па·с) при величине поверхностного натяжения 450-500 МДж/м² [13], что соответствует предъявляемым требованиям к свойствам шлака для реализации одновременного обескремнивания и десульфурации расплава в пределах объединенной реакционной зоны [4, 5, 7].

Состав шлаков, формирующихся как при обескремнивании расплава вдуванием газообразного кислорода (вар.№1, табл.2), так и при десульфурации диспергированным магнием в кварцитовом тигле (вар.№2, табл.2) отвечает области I (рис.2) состава шлаков с высокой вязкостью и повышенной температурой плавления.

Вдувание вглубь железоуглеродистого расплава смеси CaO+Al в потоке кислорода в защитной оболочке природного газа (вар.№3, табл.2) и в потоке азота (вар.№4, табл.2) привело к смещению состава формируемых шлаков системы (CaO-SiO₂-Al₂O₃) в зону нарастания концентрации 2CaO·SiO₂ (область V, рис.2) с высокой температурой конгруэнтного плавления и вязкостью. Показатели обескремнивания и десульфурации расплава в сравнении с вар. №№1, 2 в таком случае ухудшились (табл.1).

Необходимо отметить, что с началом отработки технологии рафинирования с вдуванием вглубь расплава смеси извести с алюминием в потоке кислорода [4, 5] состав формируемых шлаков (вар.№5, табл.2) переместился в область III (рис.2), что положительно отразилось на повышении показателей как обескремнивания, так и десульфурации расплава (табл.1).

Точки, отвечающие составам шлаков, полученных при рафинировании расплава по вариантам №6 и №8 (табл.2), также располагаются в области III (рис.2) с пониженной температурой плавления (1265-1400⁰С) и вязкостью.

В полном соответствии с теоретическими предпосылками при вводе в расплав алюминия по ходу вдувания доломитизированной извести и диспергированного магния с созданием как обособленных (вар. №8, №10, табл.2), так и объединенной (вар.№9, табл.2) реакционных зон совместного удаления кремния и серы состав шлаков удалось сместить ближе к границе области III (рис.2) с пониженной температурой плавления (1140-1265⁰С) и вязкостью в область IV (рис.2), что обеспечило дальнейшее повышение показателей рафинирования (табл.1) при сокращении продолжительности операции.

Выводы. Таким образом, предложенные соотношения интенсивности вдувания газов и удельного расхода порошкообразных реагентов (вар. №№8-10, табл.1) обеспечивают формирование в обособленной реакционной зоне шлака с надлежащими физико-химическими свойствами при организации одновременного рафинирования расплава по кремнию и сере [7].

Обосновано соотношение интенсивности вдувания газообразных и удельного расхода порошкообразных реагентов для формирования рафинирующего шлака с надлежащими свойствами при организации одновременного рафинирования железоуглеродистого расплава по кремнию и сере в обычном заливочном ковше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркдоган Е.Т. Технологические усовершенствования в инъекционной металлургии и в процессах рафинирования металла в ковше в 80-х годах / Е.Т.Туркдоган // Инжекционная металлургия'86: труды конференции. – М.: Metallurgy, 1990. – С.10-44.
2. Жак Р.М. Обескремнивание чугуна на литейном дворе доменных печей за рубежом / Жак Р.М., Савелов Н.И., Кондрькинская И.Д.// Черная металлургия. Бюл. НТИ. – 1992. – №1. – С.15-22.

3. Дефосфорация и десульфурация при предварительной обработке чугуна / Кавасаки Ш., Аоки М., Камимори А. [и др.] // Инжекционная металлургия '86: труды Междунар. конф. – М.: Металлургия, 1990. – С.220-229.
4. Патент № 6699 Україна, С21С1/02. Спосіб попереднього рафінування чавуну /Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Кравець А.М., Селищев В.М.; заявник та патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. унів-т. – № 20041108939; заявл. 01.11.2004; опубл. 16.05.05, Бюл.№5.
5. Сигарев Е.Н. Комплексная ковшевая обработка чугуна перед кислородно-конвертерной плавкой /Сигарев Е.Н. // Теория и практика производства чугуна: труды Междунар. научно-технической конф. – Кривой Рог: КГТМК «Криворожсталь», 2004. – С.442-446.
6. Ввод в эксплуатацию и освоение установок десульфурации чугуна в конвертерных цехах ОАО «НЛМК» / И.А.Некрасов, А.И.Дагман, В.А.Лавров[и др.] // Труды 9-го конгресса сталеплавателей. – М.: ОАО «Черметинформация». – 2007. – С.562-564.
7. Разработка комплексной технологии ковшевого рафинирования чугуна с вдуванием десульфураторов через две фурмы / Е.Н.Сигарев, А.Г.Чернятевич, К.И.Чубин, А.В.Березина // Теория и практика металлургии. – 2008. – №2. – С.3-8.
8. Охотский В.Б. Химико-термический механизм растворения извести в шлаке / Охотский В.Б. // Новости науки Приднепровья. Инженерные науки. – 2008. – №1. – С.33-34.
9. Магидсон И.А. Поверхностное натяжение и адсорбция высокоизвестковых расплавов $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ / Магидсон И.А., Басов А.В., Смирнов Н.А. // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов: тр. XIII конф, Екатеринбург, 2011. – Т.3. – С.95-98.
10. Оценка серопоглотительной способности металлургических шлаков / Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Ходотова Н.Е. [и др.] // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов:тр. XIII конф, Екатеринбург, 2011. – Т.4. –С.106-109.
11. Волосников М.И. Исследование взаимодействия металла с синтетическими шлаками с повышенным содержанием двуокиси кремния: дисс. ... канд.техн.наук / М.И.Волосников. – Свердловск, 1974. – 179с.
12. Эллиот Д.Ф. Термохимия сталеплавленных процессов / Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна Р. – М.: Металлургия, 1969. – 252с.
13. Свойства жидких доменных шлаков / В.Г.Воскобойников, Н.Е.Дунаев, А.Г.Михалевич [и др.]. – М.: Металлургия, 1975. – 184с.

Поступила в редакцию 25.05.2012.

УДК 612.791

НОСОВ Д.Г., к.т.н., доцент
ПЕРЕМІТЬКО В.В., к.т.н., доцент
ГУСЯТИНСЬКА В.С., магістр

Дніпродзержинський державний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНИХ ПОЛІВ
НА КОЕФІЦІЄНТ РОЗПЛАВЛЕННЯ ДРОТУ
ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ ПІД ФЛЮСОМ (ЧАСТИНА II)**

Вступ. Встановлення оптимальних режимів дугового наплавлення під флюсом з використанням зовнішнього електромагнітного впливу для вирішення проблеми підвищення продуктивності розплавлення електродного дроту є актуальною задачею.

Постановка задачі. В роботі [1] нами визначено математичні залежності впливу