

НОВЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Сообщение 3.

КОМПЛЕКСНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ НА ФУТЕРОВКУ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

И. Г. МУРАВЬЕВА, д-р техн. наук; Ю. С. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук, yuriy.semenov.isi@gmail.com;

Е. И. ШУМЕЛЬЧИК, канд. техн. наук

(Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины)

Важным аспектом оперативного контроля процесса доменной плавки является контроль состояния футеровки металлоприемника доменной печи, позволяющий избежать избыточного расплавления гарнисажа металлоприемника. Образующийся на рабочей поверхности футеровки горна и лещади гарнисаж является защитой от теплового разгара и эрозионного разрушения. Поэтому возможность прогноза толщины гарнисажа с целью поддержания ее рациональной величины является важной задачей с позиции защиты футеровки и продления кампании печи. Особо остро эти вопросы возникают при работе доменной печи в периоды раздувки после внеплановых остановок и выдувки.

Причинами разрушения углеродистой футеровки горна печи могут являться такие факторы, как:

– химическое растворение углерода кладки чугуном, обусловленное разницей концентраций насыщения чугуна углеродом и фактического его содержания в расплаве;

– “термический удар”, вызываемый резкими изменениями теплового состояния горна, который может возникать в момент задувки печи, когда кладка лещади с металлоприемником не имеют защитного гарнисажа.

Приведенные причины разрушения футеровки в значительной степени определяются содержанием кремния в чугуне. В работе [1] показано, что наибольшая факторная нагрузка на значение концентрации насыщения чугуна углеродом принадлежит содержанию в расплаве кремния. Установленное в результате исследований высокое значение коэффициента корреляции концентрации насыщения чугуна углеродом с массовым содержанием кремния ($-0,88$) свидетельствует о преобладающем влиянии на насыщение чугуна углеродом такого фактора, как содержание кремния в чугуне. Кроме того, в результате выполнения авторами исследований

обоснована необходимость поддержания стабильного содержания кремния в чугуне, способствующего сохранности футеровки горна печи и, таким образом, продления ее кампании.

Известно, что для оценки состояния футеровки горна и лещади доменной печи используют информацию о величине тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника, по которым рассчитывается остаточная толщина футеровки. Для получения этой информации в составе АСУ доменных печей устанавливают автоматизированные системы “Разгар” [2, 3]. В связи с особенностями алгоритмов определения толщины гарнисажа металлоприемника эта информация не может быть использована для целей оперативного управления процессами, происходящими в горне доменной печи. С целью разработки метода оперативной оценки толщины гарнисажа металлоприемника в периоды раздувки печи после ее внеплановой остановки и выдувки (в том числе и для условий отсутствия в составе АСУ системы “Разгар”) разработаны соответствующие критерии оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника.

Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника осуществлялась на основе установления зависимостей технологических параметров и показателей, отражающих влияние воздействия расплавов на футеровку, от величины тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника, по которым рассчитывается остаточная толщина футеровки.

Как показали исследования, выполненные на одной из доменных печей Украины, в условиях ее работы, характеризующихся наличием стабильного гарнисажа на холодильниках горна и лещади, между содержанием кремния в чугуне (общепринятого в качестве критерия теплового состояния доменной плавки) и тепловыми на-

грузками системы охлаждения отсутствует тесная связь. Разработка критериев осуществлялась на основе анализа показателей работы печи в течение периода, характеризующегося расплавлением сошедшего гарнисажа шахты (что вызвало внеплановую остановку печи) и ликвидацией чрезмерного загромождения горна коксовым мусором. Этот период характеризовался значительной колеблемостью анализируемых параметров и представлял интерес с точки зрения установления возможных зависимостей тепловых нагрузок от ряда показателей доменной плавки.

Приведенные на рис. 1 графики иллюстрируют изменение толщин гарнисажа верхней лещади, горна, чугунных леток и среднего их значения за период (длительностью три месяца),

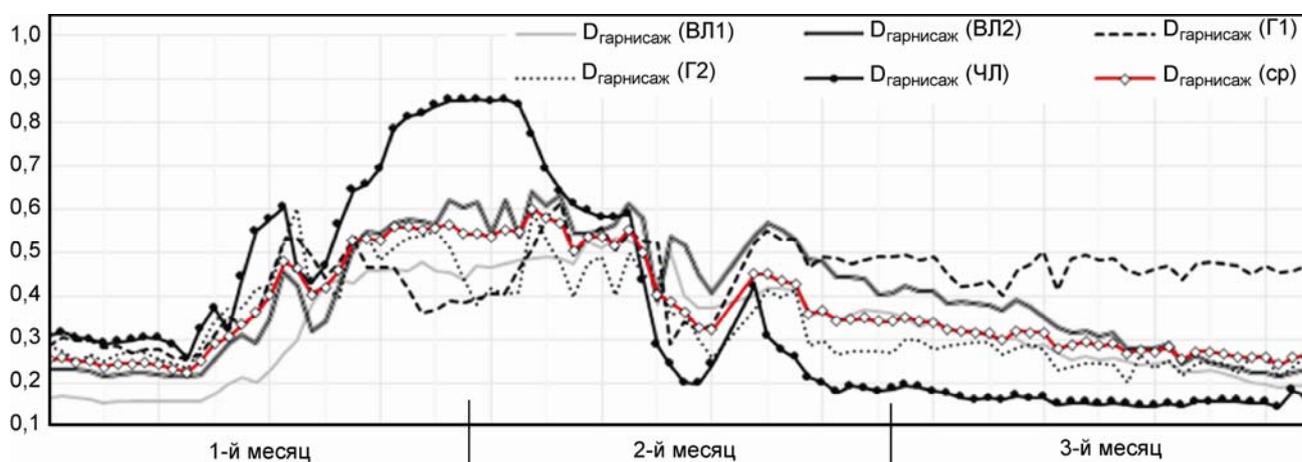


Рис. 1. Изменение толщины гарнисажа верхней лещади (ВЛ1 и ВЛ2), горна (Г1 и Г2), чугунных леток (ЧЛ) и среднего (ср) в исследуемый период работы доменной печи длительностью три месяца



Рис. 2. Изменение отношения толщины гарнисажа горна (Г1 и Г2) к толщине гарнисажа верхней лещади (ВЛ1 и ВЛ2) в исследуемый период работы доменной печи длительностью три месяца

предшествующий остановке печи, непосредственно при остановке и после вывода печи на нормальный режим работы. На рис. 2 приведено изменение отношения толщины гарнисажа в горне к толщине гарнисажа лещади, которое при стабильной работе конкретной доменной печи изменяется в диапазоне 1,4–1,6 ед. Его уменьшение в исследуемом периоде до 0,6 ед. свидетельствует о перераспределении гарнисажа между горном и лещадью. Приведенный на рис. 3 график изменения содержания глинозема (Al_2O_3) в шлаке и [Si] в чугуне в течение рассматриваемого периода отображает значительное увеличение содержания глинозема, источником чего явилась зола загруженного дополнительного кокса.

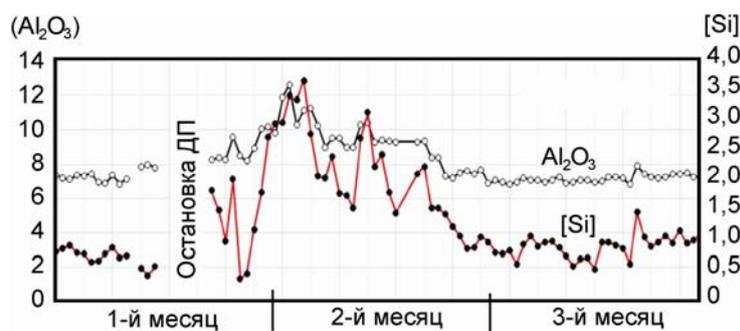


Рис. 3. Изменение содержания глинозема (Al_2O_3) в шлаке и [Si] в чугуне в исследуемый период работы доменной печи длительностью три месяца

Для разработки критерия оценки воздействия расплавов на футеровку во внимание принимались следующие параметры и показатели плавки, контролируемые АСУ доменной печи и определяющие тепловое состояние нижней зоны доменной печи:

[Si] — содержание кремния в чугуне, %;

[Mn] — содержание марганца в чугуне, %;

[S] — содержание серы в чугуне, %;

[P] — содержание фосфора в чугуне, %;

$Q_{\text{сум}}$ — суммарные тепловые нагрузки на металлоприемник доменной печи, МВт;

$V_{\text{кг}}$ — величина выхода колошниковога газа, м³/мин;

$O_{\text{сн}_2}$ — полная основность шлака, ед.;

[C] — содержание углерода в чугуне, ед.;

$D_{\text{гарнисаж}}$ — толщина гарнисажа верхней лещади (ВЛ1 и ВЛ2), горна (Г1 и Г2), чугуновых лещадок (ЧЛ) и среднего (ср), м;

η_{CO} — степень использования восстановительной способности CO, $\eta_{\text{CO}} = \frac{100\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$, %;

T_f — теоретическая температура горения кокса на фурмах, °С.

Как показано выше, на сохранность футеровки металлоприемника значительное влияние оказывает химическое воздействие расплавов. Известно, что содержание марганца в чугуне, так же как и содержание кремния, является индикатором теплового состояния печи. Содержание марганца быстрее реагирует на изменения теплового состояния печи в связи с более быстрым достижением равновесного распределения марганца между чугуном и шлаком из-за его низкого содержания в этих жидкостях [4]. Поэтому, помимо содержания кремния, исследовано влияние на изменение тепловых нагрузок параметров состава чугуна: [Mn], [S] и [P].

Тепловое состояние горна, в том числе, определяется химическим составом приходящего в горн шлака. Оценка влияния шлаковых расплавов на тепловое состояние горна печи осуществлялась с помощью полной основности шлака $O_{\text{сн}_2}$, определяемой в соответствии с выражением

$$O_{\text{сн}_2} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}. \quad (1)$$

Одним из контролируемых показателей, по которому оценивают работу газа в печи, является величина выхода колошниковога газа. Известно, что при увеличении количества углерода, сжигаемого у фурм (например, в связи с возросшей потребностью тепла), возрастает общее количество газа.

Как показано в работе [1], для контроля теплового состояния низа печи может быть использовано содержание углерода в чугуне, уровень которого оказывает влияние на растворение углерода огнеупоров металлоприемника, что определяет стойкость этого важнейшего элемента доменной печи. Для определения содержания углерода в чугуне на основе регрессионного анализа 104 выпусков чугуна, в котором в качестве критериальной величины выбрано содержание [C], а в качестве регрессоров, согласно исследованиям [1, 5], — содержание в чугуне [Si], [P], [Mn] и [S], получено выражение, позволяющее с коэффициентом корреляции 0,884 определять [C] в чугуне:

$$[C] = 5,233 - 0,326[\text{Si}] + 0,682[\text{Mn}] - 6,422[\text{S}] - 5,250[\text{P}] \quad (r_{x,y} = 0,884) \quad (2)$$

Определение параметров и показателей доменной плавки, которые могут являться аргументами в выражении разрабатываемого критерия, осуществлялось путем установления тесноты связи суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади последовательно с каждым из аргументов.

Как показал анализ корреляционных связей, наибольшую тесноту связи с суммарными тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника имеют:

– содержание кремния в чугуне [Si] — $r_{x,y} = -0,710$;

– основность шлака (как комплексный показатель воздействия шлака на футеровку и гарнисаж низа печи) — $r_{x,y} = 0,710$;

– содержание углерода в чугуне [C] — $r_{x,y} = 0,751$;

– выход колошниковога газа — $r_{x,y} = 0,658$.

На основании полученных связей тепловых нагрузок системы охлаждения и технологических параметров и показателей плавки в качестве аргументов ($x_1 \dots x_4$) комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника выбраны:

$x_1 = 1/[\text{Si}]$ — содержание кремния в чугуне в степени (-1), %;

$x_2 = [\text{C}]$ — содержание углерода в чугуне, ед.;

$x_3 = O_{\text{сн}_2}$ — полная основность шлака, ед.;

$x_4 = V_{\text{кг}}$ — величина выхода колошниковога газа, м³/мин.

При этом, поскольку содержание кремния в чугуне имеет обратную связь с величиной суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения, этот аргумент используется в критерии в степени

(–1). В результате выполнения процедуры нормирования и приведения аргументов к нормальному закону распределения, выполнения логит-преобразования каждого аргумента, определения среднего геометрического логит-преобразованных аргументов получен комплексный критерий оценки воздействия расплавов на футеровку K_{sf} , представленный следующим выражением:

$$K_{sf} = \left(F \left(\frac{1}{[\text{Si}]} \right) F([\text{C}]) F(\text{Oсн}_2) F(V_{\text{кг}}) \right)^{1/4} \quad (3)$$

Противоположный характер имеет изменение теплового состояния горна в период выдувки доменной печи. В отличие от рассмотренного выше периода ее работы, который может быть классифицирован как раздувочный после внеплановой остановки, в период выдувки изменение тепловых нагрузок обратно пропорционально изменению основности шлака и выходу колошникового газа. Это следует из анализа работы доменной печи перед ее выдувкой на длительную остановку. Анализируемый период характеризовался процессом схода гарнисажа шахты с одновременной промывкой горна, для чего в составе шихты использовались промывочные добавки. Изменение толщины гарнисажа в период выдувки печи — вначале его расплавление, а затем увеличение по мере остывания жидких продуктов плавки — показано на рис. 4. Эти процессы противоположны процессам, происходящим в металлоприемнике при раздувке после внеплановой остановки печи. Выражение для определения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку в процессе выдувки печи примет вид:

$$K'_{sf} = \left(F \left(\frac{1}{[\text{Si}]} \right) F([\text{C}]) F \left(\frac{1}{[\text{Oсн}_2]} \right) F \left(\frac{1}{V_{\text{кг}}} \right) \right)^{1/4} \quad (4)$$

Свидетельством эффективности комплексной оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника с помощью предложенных критериев является их высокая связь с тепловыми нагрузками. Как следует из рис. 5, связь разработанных критериев оценки воздействия расплавов с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника печи характеризуется следующими значениями коэффициентов корреляции: $r_{x,y} = 0,786$ — для K_{sf} , $r_{x,y} = 0,815$ — для K'_{sf} . Для сравнения: коэффициенты корреляции содержания кремния в чугуне с тепловыми нагруз-

ками имеют более низкие значения: $r_{x,y} = -0,701$ — для K_{sf} , $r_{x,y} = -0,684$ — для K'_{sf} .

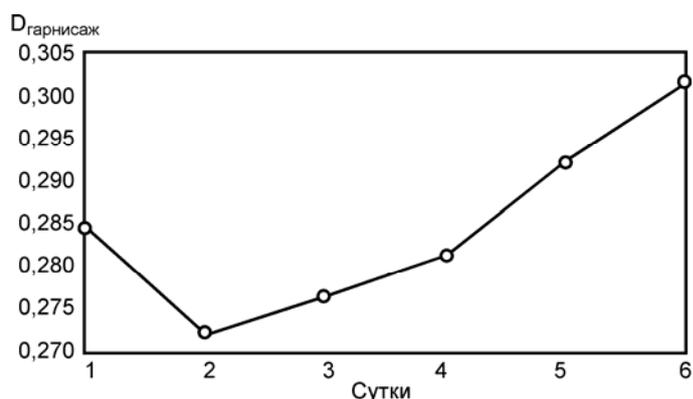


Рис. 4. Изменение толщины гарнисажа в период работы доменной печи длительностью шесть суток, предшествующий и включающий ее выдувку

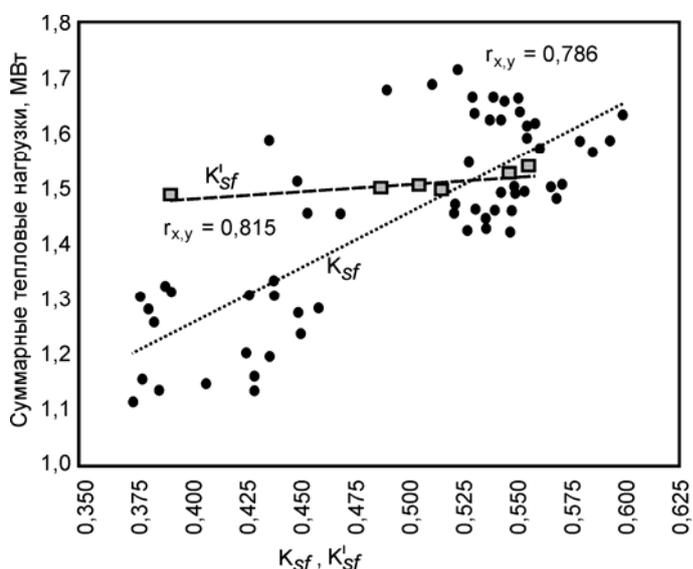


Рис. 5. Зависимости суммарных тепловых нагрузок от комплексных критериев оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника (раздувочный после внеплановой остановки период K_{sf} и период, предшествующий и включающий выдувку K'_{sf})

Для уменьшения негативного воздействия расплавов на футеровку металлоприемника с целью поддержания требуемой толщины гарнисажа необходимо обеспечивать технологические условия, согласно которым критерии K_{sf} и K'_{sf} будут принимать рациональные значения. Представленные на рис. 6 зависимости толщины гарнисажа металлоприемника от величин критериев позволяют определить граничные условия их изменения.

Как следует из рис. 6, граничные значения комплексного критерия при работе доменной печи в переходных режимах (в конце раздувоч-

ного периода и перед выдувкой) изменяются в диапазоне $0,475 < K_{sf} (K'_{sf}) < 0,600$. Для условий работы доменной печи в периоды раздувки после внеплановой остановки и выдувки печи диапазон изменения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи составляет $0,375 \leq K_{sf} (K'_{sf}) \leq 0,475$.

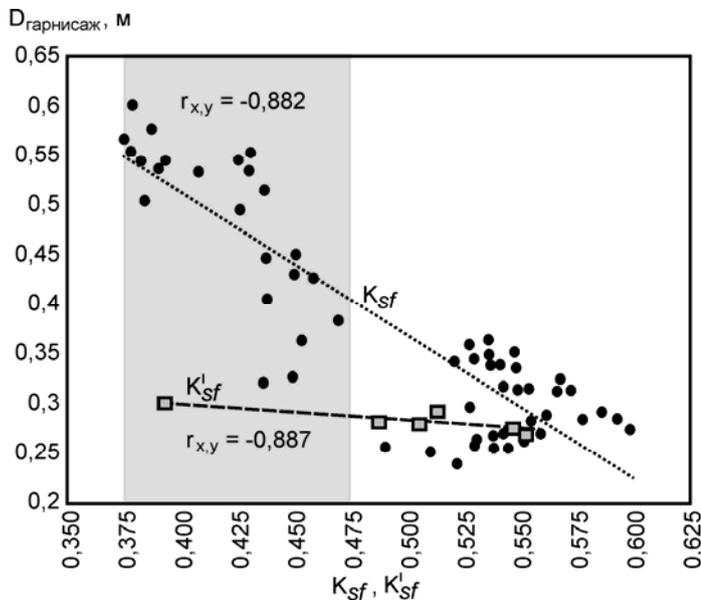


Рис. 6. Зависимости толщины гарнисажа металлоприемника от комплексных критериев K_{sf} и K'_{sf}

Как показали результаты исследований, в периоды раздувки печи после внеплановой остановки между толщиной гарнисажа металлоприемника и критерием K_{sf} существует тесная обратная связь, характеризуемая коэффициентом корреляции $-0,882$. Основываясь на этой связи, предложен метод оперативной оценки толщины

гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа.

Метод оперативной оценки толщины гарнисажа металлоприемника в периоды раздувки печи после ее аварийной остановки включает:

1. Определение среднечасовых значений параметров, входящих в выражение критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи.
2. Определение текущего значения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи.
3. В соответствии с зависимостью, представленной на рис. 6, для рассчитанного значения K_{sf} определение с коэффициентом корреляции $-0,882$ значения толщины гарнисажа металлоприемника.
4. Обоснование выбора управляющих воздействий по регулированию теплового состояния горна, не вызывающего разрушительного воздействия на футеровку.

Использование предложенного метода позволит избежать избыточного расплавления гарнисажа металлоприемника, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, что в свою очередь влечет уменьшение продолжительности кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна. Целесообразной является реализация предложенного метода оперативной оценки толщины гарнисажа металлоприемника в составе системы контроля остаточной толщины футеровки горна и лещади ("Разгар").

Заключение

С целью оценки комплексного влияния различных факторов на состояние футеровки металлоприемника при работе доменной печи в периоды раздувки печи после ее внеплановой остановки и выдувки разработаны критерии оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи. Разработка критериев оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника осуществлялась на основе установления зависимостей технологических параметров и показателей, отражающих влияние воздействия расплавов на футеровку, от величины тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника, по которым рассчитывается остаточная толщина фу-

теровки. Определены граничные условия изменения комплексного критерия для работы доменной печи в переходных режимах (в конце раздувочного периода и перед выдувкой), которые изменяются в диапазоне $0,475 < K_{sf} (K'_{sf}) < 0,600$. Для условий работы доменной печи в периоды раздувки после внеплановой остановки и выдувки печи диапазон изменения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи составляет $0,375 \leq K_{sf} (K'_{sf}) \leq 0,475$. Разработан метод оперативной оценки толщины гарнисажа металлоприемника в периоды раздувки печи после ее внеплановой остановки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи / Н. М. Можаренко, А. А. Параносенков, Г. В. Панчоха и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. 2006. Вып. 12. С. 77–84.
2. Диагностирование состояния футеровки металлоприемника доменной печи по тепловым нагрузкам / Е. Е. Гаврилов, А. Г. Ульянов, В. В. Канаев и др. // Сталь. 1987. № 1. С. 13–15.
3. Современные методы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи / Д. В. Пинчук, Г. В. Панчоха, В. В. Канаев, Н. М. Можаренко // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. 2005. Вып. 11. С. 247–253.
4. Жеребин Б. Н. Практика ведения доменной печи. — М.: Металлургия. 1980. — 248 с.
5. Поиск оптимальных условий доменной плавки, обеспечивающих достижение высокой степени науглероживания чугуна / О. В. Кукса, Н. М. Можаренко, Э. И. Лыгари и др. // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. 2014. Вып. 29. С. 75–81.

УДК 669.162.16

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЗАГРУЗКИ КОКСОВОГО ОРЕШКА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ КОМПАКТНЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ ЛОТКОВОГО ТИПА

С. К. СИБАГАТУЛЛИН¹, *д-р техн. наук*; А. С. ХАРЧЕНКО¹, *канд. техн. наук, as.mgtu@mail.ru*; Г. Н. ЛОГАЧЕВ²
(¹ ФГБОУ ВО “Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова”, ² ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”)

Постановка проблемы

Черная металлургия — одна из наиболее энергоемких отраслей промышленности. Около 20 % общезаводских затрат приходится на приобретение топливно-энергетических ресурсов. Самым крупным их потребителем остается доменное производство. На его долю приходится около 50 % энергоресурсов, используемых черной металлургией.

Из производимого для доменных печей кокса пригодная по крупности часть для непосредственного применения составляет около 80 %. Ввиду этого происходит избыточное расходование дефицитных и дорогостоящих коксующихся углей, мировые разведанные запасы которых в настоящее время не превышают 400 млрд т [1]. Одним из направлений снижения удельного расхода кокса является вовлечение в технологию производства чугуна коксового орешка крупностью 10–25 мм и коксовой фракции крупностью 25–40 мм [2–4], обладающих повышенной холодной прочностью по сравнению со скиповым коксом [5, 6], более высокой эквивалентной по поверхности крупностью, чем агломерат и окатыши. Хотя способы их использования совместно с железорудной частью шихты уже из-

вестны, но многие заводы испытывают существенные трудности при их реализации, поскольку мелкие фракции кокса оказывают большое влияние на дренажную способность горна [2, 7, 8], газопроницаемость слоя шихты [9, 10], степень и скорость восстановления железорудной части шихты [11, 12]. Причинами негативного влияния орешка на фильтрующую способность коксовой насадки являются неравномерное его распределение по окружности колошника и отличие от оптимального размещения по радиусу. Особенно это проявляется на печах, оснащенных компактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа, поскольку такие агрегаты не обеспечивают равномерного окружного распределения компонентов шихты в связи с малой длительностью опорожнения бункера совместно с действием других факторов [13, 14].

В связи с этим актуальной задачей для производства чугуна является разработка режима использования орешка в печах, оснащенных компактным лотковым загрузочным устройством, исключая его негативное действие на ход процессов, в том числе на фильтрующую способность коксовой насадки в горне.