

Рис. 3. Влияние содержания фосфора в металле в начале обработки на его конечное содержание

Анализ параметров, влияющих на восстановление фосфора в процессе внепечной обработки, позволил установить зависимость содержания фосфора после внепечной обработки ($[P]_{\text{кон}}$) от его начального содержания ($[P]_{\text{нач}}$) (рис. 3).

Кроме того, увеличение обработки на УПК ($\tau_{\text{УПК}}$) и в целом всей внепечной обработки ($\tau_{\text{внеп.обр}}$), включающей в себя еще и обработку на вакууматоре, способствует получению больших значений содержания фосфора в металле после внепечной обработки (рис. 4).

Таким образом, для обеспечения содержания фосфора в готовой стали $\leq 0,015$ необходимо проводить тщательную отсечку конвертерного

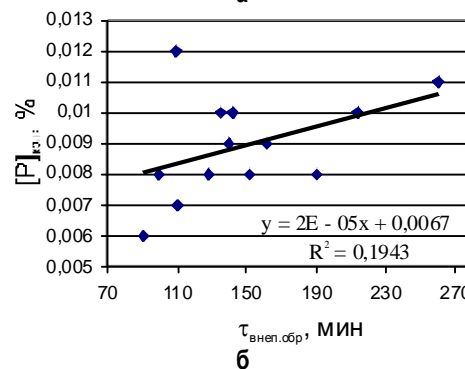
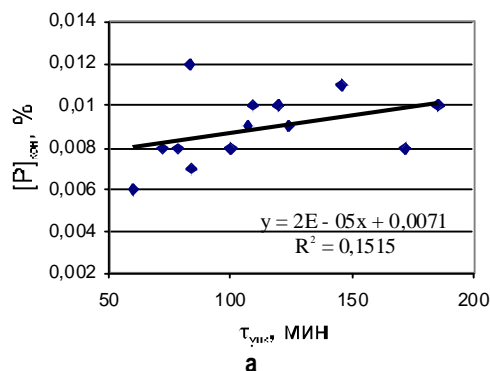


Рис. 4. Влияние продолжительности обработки на УПК ($\tau_{\text{УПК}}$) (а) и всей внепечной обработки ($\tau_{\text{внеп.обр}}$) (б) на содержание фосфора в металле в конце обработки

шлака и иметь в металле в начале обработки на УПК его содержание не выше 0,011...0,012%.

УДК 621.36

В. А. Бигеев, А. Е. Малофеев, А. В. Пантелеев, О. А. Николаев, А. Х. Валиахметов

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ДСП НА ДЛИННЫХ ДУГАХ

Главным источником поступления тепловой энергии в рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи является электрическая дуга. Создание оптимальных условий работы дуги является одним из основных вопросов в разработке технологии современной скоростной электроплавки.

Степень усвоения тепловой энергии, передаваемой от электрода металлу, напрямую зависит от толщины слоя шлака (рис. 1). При свободном горении дуги общая степень передачи энергии металлу составляет 36%, если исходить из того, что общее количество остальной излучаемой энергии распределяется между стенкой печи, сводом печи и жидкой ванной (по одной трети). Если дуга наполовину своей длины или полностью погружена в шлак, то излучаемая дугой энергия будет передаваться примерно наполовину или полностью (с учетом теплопроводности шлака) ванне металла. Коэффициент использования энергии составит тогда 65 и 93% [1].

По данным исследований фирмы «VAI FUECKS» для создания наиболее благоприятных условий горения дуги толщина слоя шлака $H_{\text{шл}}$ должна на 20% перекрывать длину дуги $L_{\text{дуг}}$ (рис. 2). Это связано, прежде всего, с неравномерностью распределения толщины слоя шлака по ванне металла.

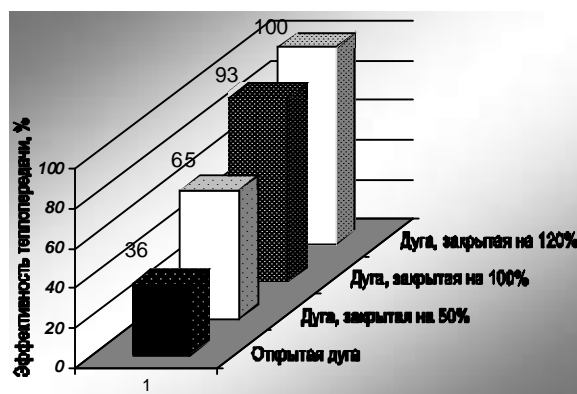


Рис. 1. Влияние высоты слоя шлака на эффективность теплопередачи от электрода ванне

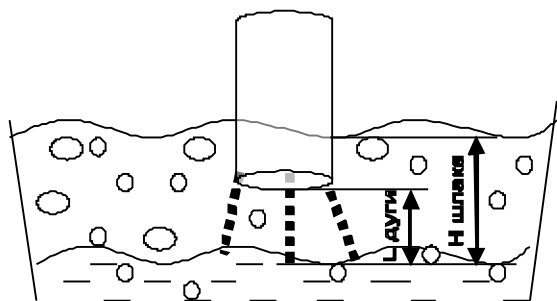


Рис. 2. Наиболее благоприятные условия горения дуги по данным исследований «VAI FUELS»

$$H_{шл} = 1,2 L_{дуг} \quad (1)$$

Длина дуги связана с напряжением $U_{дуг}$ зависимостью:

$$L_{дуг} = U_{дуг} - 25 \quad (2)$$

Работа на длинных дугах позволит вести шлавку на повышенных ступенях трансформатора. Дуги, погруженные в шлак, горят стабильнее, уменьшаются колебания силы тока и напряжения, что позволяет повысить вводимую в печь мощность примерно на 15% и, следовательно, сократить токовое время и общую продолжительность плавки, уменьшить удельный расход электроэнергии. В результате увеличения длины дуги, а также меньшего бокового расхода при экранировании дуг шлаком снижается расход электродов и износ футеровки. Снижаются уровень шумовыделения печи и помехи в электрические сети. Таким образом, увеличение длины дуги лимитируется толщиной шлака.

Обозначенную толщину шлака необходимо достигать и поддерживать путём его вспенивания, посредством инъекции мелкодисперсного углеродсодержащего материала в струе кислорода с помощью стеновых фурм, манипулятора или фурм, вводимых вручную через рабочее окно. Углерод рекомендуется вдувать в зону ниже уровня раздела шлак–металл для улучшения науглероживания ванны. Вспенивание шлака и устойчивость пены лучше всего обеспечивать интенсификацией ввода кислорода в печь при повышении его расхода до $50 \text{ м}^3/\text{т}$ и вдуванием угольного порошка при удельном расходе до $10 \text{ кг}/\text{т}$. Для устранения закозления торца фурмы через кольцевой зазор вокруг канала подачи угля вдувают дополнительный газ. Идеальным для поддержания шлаков во вспененном состоянии является использование металлизированных окатышей, содержащих углерод и кислород и, что не менее важно, равномерно вводимых в реакционную зону. Вспененный шлак образуется вблизи зоны вдувания углерода. Даже при перемешивании ванны, вызванном электромагнитным эффектом дуг, равно-

мерность распределения вспененного шлака по площади ванны может быть улучшена при соответствующем расположении инжекторов. Это достигается, например, путем вдувания углерода и кислорода с помощью стеновых инжекторов, установленных так, чтобы вспененный шлак образовывался около них и распространялся в зоны, где он обычно не образуется.

Вспенивание шлака происходит при диспергировании в объёме жидкого шлака, выделяющегося из жидкой стали монооксида углерода. Вспененный шлак представляет совокупность пузырьков монооксида и диоксида углерода, разделенных тонкими прослойками шлака. Образование и устойчивость вспененного шлака зависят от физико-химических свойств шлака, от интенсивности и места газовыделения.

Удельный расход энергии при плавке под вспененным шлаком ниже, чем при наличии плохо вспененного шлака, что объясняется лучшей передачей энергии, достигаемой вследствие экранирования дуг, возможностью работы на длинных дугах, частичного нагрева сопротивлением и передачи тепла конвекцией через слой шлака в системе металл–шлак, вводом дополнительного тепла окисления углерода и увеличением степени дожига монооксида углерода в объёме шлака. Особенно высокая экономия энергии достигается при присадке необожженного доломита, хотя на разложение доломита расходуется энергия. Увеличение расхода энергии на расплавление повышенного объёма шлакообразующих добавок компенсируется положительным энергетическим эффектом оптимальной работы дуги и вспененного шлака. Экономия энергии при плавке стали под вспененным шлаком достигает $10\text{--}30 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ жидкой стали [1].

Несмотря на отсутствие единого мнения по поводу конкретных математических формул, большинство моделей поведения шлака объединяет использование таких параметров, как вязкость, поверхностное натяжение, плотность, а также средний диаметр пузырьков газа. Принято считать, что эти факторы коррелируют с коэффициентом пенообразования, который выражается чаще всего в секундах и характеризует продолжительность прохождения слоя определенной толщины H (м) пузырьками вспенивающего газа со скоростью (м/с) и перемещение пузырьков вспенивающего газа [3].

$$\Sigma = H/U \quad (3)$$

Вспенивание шлака пропорционально скорости выделения окиси углерода и среднему времени пребывания пузырей в ванне.

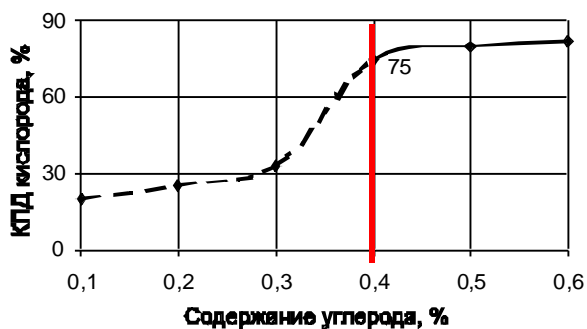


Рис. 3. Зависимость коэффициента полезного действия вдуваемого кислорода на вспенивание от содержания углерода в ванне

Разработано несколько теоретических и эмпирических моделей, в которых коэффициент пенообразования — функция перечисленных параметров, один из вариантов которого [3] представляется зависимостью

$$\Sigma K \cdot \mu / (\rho \cdot \sigma)^{1/2}, \quad (4)$$

где K — эмпирическая константа, определяемая химическим составом шлака; μ — вязкость, Па·с; ρ — плотность, кг/м³; σ — поверхностное натяжение, Н/м.

Опыт работы дуговых печей показывает, что формирование хорошо вспененного шлака обеспечивается при основности шлака, равной 2,0–2,2, температуре ванны 1550–1580°С, содержании в шлаке около 20–24% FeO и 8–12% Mg, содержании в ванне 0,3–0,5% С. Вспениванию шлака и устойчивости пены благоприятст-

вуют повышенная вязкость шлака, низкое межфазное натяжение, малый размер и большое количество выделяющихся пузырьков монооксида углерода в начальный период плавки.

После выпуска плавки в печи остается часть жидкого металла, содержание углерода в котором обычно меньше 0,03%. Поэтому для оптимизации работы дуги и процесса в целом необходимо ускорить формирование вспененного шлака. Сначала необходимо проводить загрузку углерода, некоторого количества извести и окалины в остаток предыдущей плавки до загрузки первой корзины с металлошихтой либо окалину, известь и углерод загружать на дно первой корзины с шихтой. В результате, несмотря на дополнительное время на науглероживание жидкого остатка, не будет задержки с подводом максимальной электрической мощности.

Кроме того, эффективность передачи теплоты топливно-кислородных горелок при вдувании факела в объем вспененного шлака возрастает с 40 до 70% по сравнению с вдуванием при плоской ванне. То есть работа горелок становится эффективной не только в период плавления, но и в течение всей плавки, что способствует повышению производительности печи и снижению удельного расхода электроэнергии (рис. 3).

Автоматическая система управления плавки ДСП регулирует коэффициент пенообразования в зависимости от состояния защищенности дуги шлаком, которое чаще всего определяется по уровню общих гармонических колебаний дуги (рис. 4).

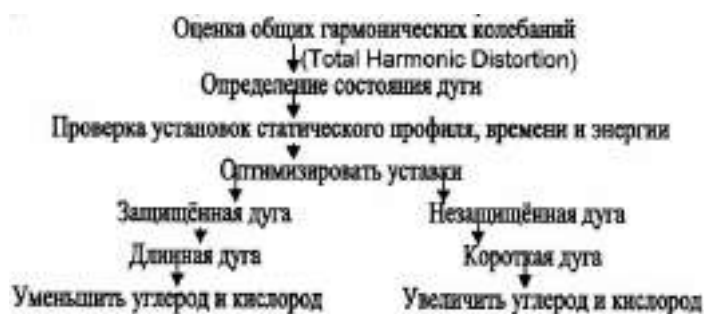


Рис. 4. Принцип управления на основе состояния защиты дуги

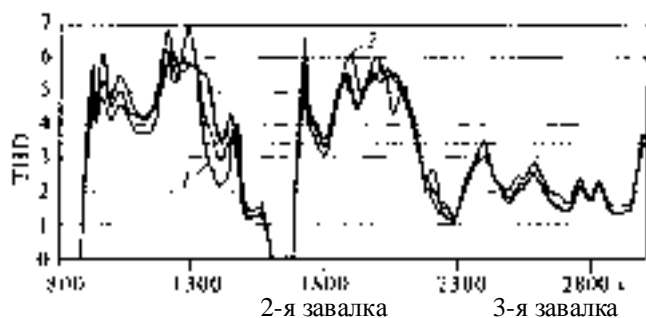


Рис. 5. Корреляция между степенью защиты электродуги и уровнем шума:
1 — незащищенная дуга; 2 — защищенная дуга

Хотя, в принципе, оперировать толщиной слоя шлака $H_{шл}$ очень просто, на практике измерить её весьма трудно как в реальной печи, так и в упрощенных условиях лабораторного эксперимента.

Фирмой «Danieli» Automation были проведены несколько успешных испытаний с измерением физических параметров, относящихся к процессу вспенивания шлака. Специально сконструированная аппаратура контролировала сигналы двух типов — электрические и акустические. На основании опыта работы группы «Danieli» на различных предприятиях показано, что акустические сигналы прямо коррелируют с электрическими. Поэтому в дальнейшем будем ограничиваться только такими электрическими сигналами, как общие гармонические колебания (THD) (рис. 5, 6) [3].

Вспенивание шлака прямо влияет только на один металлургический параметр — содержание азота в стали. В настоящее время, ввиду проекта активного строительства трубопроводов для экс-

порта газа из России на восток, появляется потребность выплавки в электропечах трубной стали с содержанием азота до 0,005%, способной выдерживать давление до 250 атм. При контакте атмосферы с дугой идёт ионизация газов и возрастает их активность. Хорошее вспенивание приводит к снижению концентрации азота до уровня около 0,004% в результате лучшей защиты металла от атмосферы печи слоем вспененного шлака в течение всей плавки. Однако в конце плавки происходит неизбежное насыщение азотом ввиду низкого содержания углерода в ванне (до 0,04%) и недостаточного вспенивания шлака (см. рис. 3).

Работа со вспененными шлаками может давать и отрицательные эффекты – выбросы чрезмерно вспененного шлака или его выделение через рабочее окно и электродные отверстия. Кроме того, окисление вдуваемого углерода приводит к увеличению объема образующихся технологических газов в 1,5 раза и их теплосодержания в 2,5 раза, что требует повышения мощности и объемов системы газоотсоса.

В перспективе представляет интерес установление зависимостей между рассмотренными физическими величинами для реализации простого и эффективного управления электрической дугой и процессами вспенивания. Исследования в производственных условиях должны быть нацелены на определение связи между параметрами

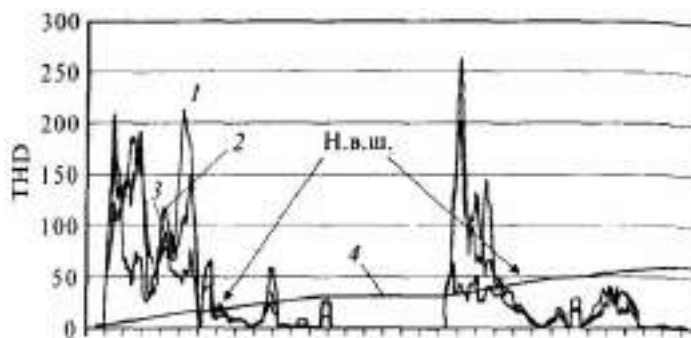


Рис. 6. Уровень стабильности дуги:

1, 2, 3 – приведенная погрешность электрода 1, 2 и 3 соответственно;
4 – энергопотребление; Н.в.ш. – начало вспенивания шлака

ми процесса (длиной дуги, подводимой мощностью, вдуванием кислорода, вдуванием газа и пылевидного угля, изменением температуры) и электрическими сигналами. Результаты будут использованы для динамического управления плавкой, а также для определения простых взаимосвязей электрической дуги со вспениванием шлака (химическим составом шлака, примерной толщиной его слоя, экономией электроэнергии, уменьшением износа огнеупоров, снижением потребления электродов и контролем над содержанием азота). Объединение оптимальных условий горения дуги и вспенивания шлака с другими стратегиями управления процессом плавки, которые уже успешно внедрены в практику, – очередной шаг на пути оптимизации технологии выплавки стали.

Библиографический список

1. Поррачин П., Онести Д. Вспенивание шлака // *Электротехнология*. 2005. № 3.
2. Баптизмантий В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. М.: *Металлургия*, 1975. 367 с.
3. Гроссо А., Миани Ф. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП // *Сталь*. 2005. № 4.
4. Дюдкин Д.А. Технологические и энергетические аспекты эксплуатации агрегата ковш-печь // *Сталь*. 2005. № 8. С. 30.