



Колесникова Е. В. /д. т. н./
Одесский национальный
политехнический университет

Экспериментально-аналитическое описание процессов выплавки стали в электродуговой печи при создании тренажера

Разработаны экспериментально-аналитические основы построения математического описания для металлургических процессов при выплавке стали в электродуговых печах, ориентированные на использование в компьютерных тренажерах для персонала. Ил. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: электродуговая печь, процессы, равновесие, эксперимент, данные, моделирование

Develop experimental and analytical basis for building a mathematical description for metallurgical processes in the smelting of steel in electric arc furnaces, focused on the use of computer simulators for personnel.

Keywords: electric arc furnace, processes, counterpoise, essay, data, modeling

Современные тенденции в управлении сталеплавильными производственными процессами ориентируют на создание условий систематического обучения персонала в виде тренинга для обеспечения качественной работы сталеваров.

Развитие сталеплавильного производства сопряжено с формированием условий автоматизации производственных процессов и направлено на увеличение производительности и технико-экономических характеристик плавок. В условиях сталеплавильного производства имеет место существенное противоречие между весьма высоким уровнем информационного обеспечения процессов и, отнюдь, невысокой степенью использования компьютерных систем для управления процессами ведения плавки. Поэтому сталевары, как правило, при принятии решений основываются только на своем опыте, знаниях и интуиции, что часто не приводит к наилучшим показателям с точки зрения затрат электроэнергии и рационального расхода исходных материалов [1]. Разработка проекта тренажера в виде автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) выплавки стали, позволит сталевару-

оператору научиться принимать верные решения, основываясь не на интуиции, а на данных моделирования процесса. Тренинг сталеваров с помощью специализированного компьютерного тренажера, имитирующего металлургические процессы выплавки стали, позволит сформировать практические навыки принятия решений по управлению процессом и наглядно продемонстрировать сущность процессов, протекающих в системе [2].

1. Постановка проблемы

Сформулируем основные требования к продукту проекта – автоматизированной системе обучения и тренинга сталеваров дуговой сталеплавильной печи:

- назначение: развитие мышления сталеваров и выработки навыков эффективного управления технологическим процессом;
- форма продукта: компьютерный тренажер, включающий информационно-справочную систему и подсистемы обучения автоматизированного контроля знаний с применением тестов, тренинга и отображения результатов;
- возможность развития: система имеет открытую архитектуру и обеспечивает возможность расширения с подключением других под-

систем для обучения технологического персонала металлургического предприятия.

2. Связь проблемы с важными научными и практическими задачами

Задача сталевара заключается в проведении процесса выплавки с соблюдением норм технологического режима для получения стали заданного качества с наименьшими технологическими затратами [2]. Целевая функция, определяющая эффективность принятых решений по управлению процессом, может определяться по реальным производственным данным либо на основе математического моделирования [3]. Состав исходных материалов плавки, а также характеристики плавильной печи изменяются от плавки к плавке. В такой постановке задачи управления в качестве управляющих воздействий процесса сталевар может использовать не только множество операций процесса, изменяющих состояние равновесия системы «металл – шлак», но и качественные параметры – вещества, применяемые на отдельных стадиях процесса [4].

Структура программного продукта строится по иерархическому принципу. Обучаемый последовательно проходит соответствующие уровни обучения, получая знания знакомства, знания воспроизведения, знания умения и на последнем этапе с помощью тренажера должен достичь уровня знаний творчества, которые позволят сталевару принимать решения как в штатных, так и при аварийных ситуациях.

Реализация проекта подготовки персонала сталеплавильных печей на тренажере является первым этапом внедрения АСУ ТП с применением компьютерных технологий для управления процессом и поддержки принятия решений. Важнейшей составляющей компьютерной системы поддержки принятия решений для управления дуговыми сталеплавильными печами и тренажерного программного ком-

плекса является подсистема расчета химического равновесия и материального баланса, которая предназначена для определения результатов технологического процесса в ходе плавки в зависимости от выбранного типа и массы компонентов, загружаемых в печь на отдельных стадиях процесса [5].

Применяемые на практике методы расчета состава металла в ванне печи основаны на использовании определяемых экспериментально коэффициентов «угара» либо «усвоения» шлакообразующих, легирующих или раскисляющих материалов [6]. Такой подход позволяет определить массу реагентов приблизительно, что приводит к неоправданному расходу материалов и увеличению продолжительности процесса в связи с необходимостью дополнительной корректировки состава металла в ванне печи [7].

3. Цель работы

Разработка математического описания технологического процесса выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах на основе декомпозиционного представления, включающего расплав металла, шлак, стенки и под печи, атмосферу печи.

4. Математическое описание процесса

Процесс выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи осуществляется по периодической схеме, включающей загрузку металлической части шихты и шлакообразующих компонентов, плавление шихты, проведение окислительного и восстановительного периодов, операции рафинирования и корректировки состава расплавленного металла перед выпуском [4].

Математическая модель процесса выплавки стали должна отображать изменение состава расплава металла, шлака, влияние футеровки печи на конечные результаты [5]. В общем случае необходимо рассматривать следующие элементы системы: металл, шлак, атмосфера и футеровка печи [8] (рис. 1).

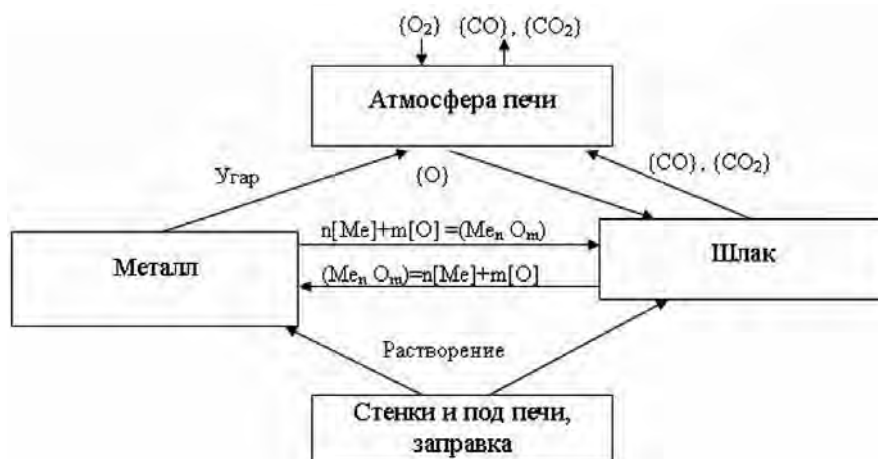


Рис. 1. Взаимодействующие элементы сталеплавильной печи

Уравнение материального баланса печи как агрегата идеального смешения периодического действия. При этом можно рассматривать металл и шлак как отдельные взаимодействующие системы:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= -W_i + r_i - u_i \\ \frac{dx_s}{dt} &= -W_s + r_s \end{aligned} \quad (1)$$

где x – концентрация компонентов в металле ($i = 1, 2, \dots, k$) и шлаке ($s = 1, 2, \dots, m$), %; W – скорость химических реакций, c^{-1} ; r – скорость растворения компонентов футеровки и заправки, c^{-1} ; u – скорость утара шихты и расплава при воздействии электрической дуги, c^{-1} ; t – время пребывания компонентов в системе.

Уравнение энергетического баланса печи

$$(m_{Me}c_{Me} + m_{sl}c_{sl}) \frac{dT}{dt} = m_{Me} \sum_{j=1}^{k+m} W_j(-\Delta H_j) - \sum_{l=1}^h Q_l + P, \quad (2)$$

где m_{Me} , m_{sl} – масса металла и шлака в ванне печи, кг; c_{Me} , c_{sl} – теплоемкость металла и шлака в ванне печи, Дж/(кг К); ΔH – энтальпия химических реакций, Дж/кг; Q – скорость отвода тепла из системы за счет охлаждения свода, теплопередачи через внешнюю поверхность печи, с дымовыми газами печи и др., Дж/с; P – тепловая мощность печи, Дж/с;

5. Уравнения кинетики и равновесие металлургических реакций

В связи с тем, что известные кинетические зависимости недостаточно надежно отображают специфику металлургических процессов [6] в работе принята эмпирическая формула для описания кинетики окисления углерода. Указанная зависимость получена на основе экспериментальных данных для печи ДСП-3М в предположении, что окисление углерода происходит по реакции первого порядка

$$-\frac{dC}{dt} = kC, \quad (3)$$

где C – концентрация углерода, %; t – время, мин.

После интегрирования приведенного уравнения получим: $C = C^{нач} e^{-kt}$.

На рис. 2 сопоставлены данные экспериментов (Emp) для трех контрольных плавов с расчетными значениями (dC). Полученное при пассивном эксперименте уравнение применимо для печи типа ДСП-3М с кислой футеровкой при следующих условиях: температура процесса – 1540–1630 °С, расход железорудных окатышей 0,6–0,8 кг/т металла при каждой загрузке.

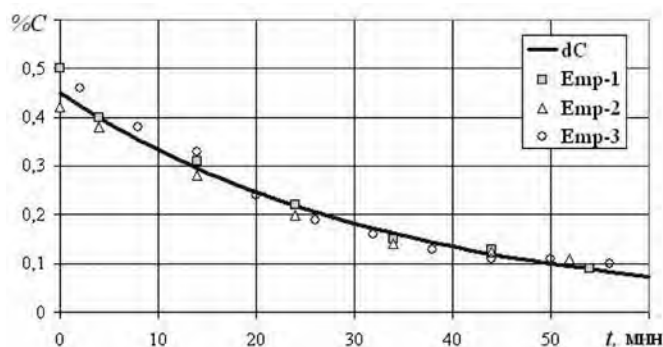


Рис. 2. Сопоставление эмпирических и расчетных данных

Во время эксперимента новая порция окатышей присаживалась в ванну, после того как кипение металла начинало успокаиваться. Поэтому полученное уравнение в общем случае не является кинетической зависимостью, оно отображает характер изменения концентрации углерода во время окислительного периода в реальных условиях производства при соблюдении требований технологического регламента.

Все другие реакции, кроме окисления углерода, достигают состояния равновесия. Такое допущение приемлемо, так как все технологические операции завершаются, как правило, 5-10 минутной паузой – выдержкой, которая необходима для выравнивания концентраций компонентов стали в ванне, а также удаления растворенных в металле газов и окислов [4].

В общую модель также включены эмпирические соотношения между различными параметрами процесса: распределение серы между шлаком и металлом [4], окислительная способность различных раскислителей [6], средняя скорость охлаждения печи при отключении электрической дуги.

Кроме этого учтены ограничения на параметры, которые принимаются во внимание при моделировании. Ограничением области применения математического описания процесса является температура перехода металла в твердое состояние $T > T_{кр}$ в связи с тем, что металлургические превращения при выплавке стали проходят в расплавленном металле. Вторым ограничением является производительность печи. Масса завалки шихты в тоннах должна находиться в пределах $1,2 \leq G \leq 4,5$.

При загрузке малой массы шихты происходит интенсивное воздействие электрической дуги на материал пода печи, что приводит к разрушению футеровки. А превышение допустимой массы загрузки шихты приведет к тому, что полученные результаты не будут отвечать действительности, так как печь по своим конструктивным характеристикам не может вместить больший объем металла.

Начальные условия для каждой j -ой стадии процесса, исключая начальную загрузку металлической части шихты и шлакообразующих компонентов, будут следующими:

$$\begin{aligned} t_j &= 0; \\ X_j &= X_{j-1}; \\ G_j &= G_{j-1}; \\ S_j &= S_{j-1}; \\ T_j &= T_{j-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

где t – время, мин; X – состав компонентов жидкого металла в ванне печи, %; G – масса жидкого расплава в ванне печи, кг; S – состав компонентов шлака, %; T – температура, °C; j – номер процесса: загрузка (0), плавление шихты (1), окисление (2), восстановление (3), операции рафинирования (4) и корректировки состава расплава металла перед выпуском (5).

В стационарном состоянии принимается, что во всем объеме ванны печи температура одинакова. При этом в печи образуются две системы, которые находятся в состоянии равновесия: расплав металла и шлак [5]. В каждой из этих систем концентрации элементов одинаковы, но не равны. То есть, например, концентрация кремния во всем объеме расплава одинакова, но в шлаке кремний находится в виде SiO_2 , и его концентрация отличается от концентрации кремния в расплаве.

Число степеней свободы системы уравнений математического описания определяется как разность между числом переменных и числом связывающих их уравнений [5]. Полное математическое описание включает 199 переменных, входящих в 161 уравнение. Соответственно, число степеней свободы – 38. Из этих переменных необходимо вычесть 21 переменную условий процесса и задаваемых данных в начале расчета:

- 6 переменных, характеризующих состав огнеупоров;
- 12 переменных, характеризующих угар шихты, характеристики растворения заправки печи и пода;
- 3 переменные, участвующие в расчете баланса по кислороду, а именно – площадь зеркала расплавленного металла, скорость поглощения кислорода из атмосферы печи и степень расплавления известняка.

В результате получаем 2 степени свободы и, соответственно, 2 переменные, которые необходимо задавать – мощность трансформатора печи и время, а также 15 переменных, являющихся исходными компонентами металла и шлака, которые определяются исходя из данных завалки печи. Это и есть управляющие параме-

тры каждой стадии, управление которыми позволяет персоналу печи вести плавку.

6. Выводы и рекомендации

Использование принципа декомпозиции процесса выплавки стали в электродуговых печах на стадии позволяет перейти к типовым моделям отдельных стадий при построении АСУ ТП, а также тренажерных программ для сталеваров. Важной особенностью предлагаемого подхода является возможность его реализации в производственных условиях. Так как для принятия обоснованных технологических решений предполагается дополнительно к используемым параметрам учитывать результаты моделирования отдельных стадий процесса.

Применение современных средств вычислительной техники для поддержки принятия решений в рамках АСУ ТП, а также в тренажерных системах, позволяет устранить вычислительные ограничения и выполнять расчет параметров процесса на основе экспериментально-аналитических зависимостей.

Приведенный способ учета взаимодействия элементов сталеплавильной печи и использование реальных экспериментальных данных для расчета по полученной эмпирической зависимости кинетики окисления углерода позволяет выполнять многовариантные расчеты материального баланса плавки. Полученные результаты могут служить для построения АСУ ТП, также будут полезными при разработке компьютерного тренажера для сталеваров дуговой сталеплавильной печи.

Библиографический список

1. Завгородній М. С. Методика розрахунку головних ознак проекту в умовах невизначеності / М. С. Завгородній // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2012. – № 6. – С. 70-73.
2. Колесникова Е. В. Оценка компетентности персонала сталеплавильной печи в проекте компьютерного тренажера / Е. В. Колесникова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5/1 (65). – С. 45-49.
3. Janabi-Sharifi F. An adaptive system for modelling and simulation of electrical arc furnaces / F. Janabi-Sharifi, G. Jorjani // Control Engineering Practice. Published by Elsevier Ltd. – 2009. – Vol. 17 (10). – P. 1202-1219.
4. Сидоренко М. Ф. Теория и технология электроплавки стали / М. Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1985. – 270 с.
5. Колесникова Е. В. Математическое описание процесса выплавки стали / Е. В. Колесникова, Ю. А. Быстров, А. С. Лопиков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2007. – № 2 (28). – С. 155-157.

6. Явойский В. И. Теория процессов производства стали / В. И. Явойский. – М.: Металлургия, 1967. – 792 с.

7. Новікова Л. Ю. Проектування нечіткої системи впливу складу і якості шихти на показники процесу агломерації / Л. Ю. Новікова, О. І. Михальов // Системные технологии. Меж-

вуз. сб. науч. работ. – № 6 (71). – Днепропетровск, 2010. – С. 148-153.

8. Охотский В. Б. Закономерности износа сталеплавильной футеровки / В. Б. Охотский, А. Д. Зражевский // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 1 (286). – С. 28-31.

Поступила 10.08.2015



УДК 621.771.25:621.38.049.77

Наука

Бешта А. С., Бойко О. А., Дудкина В. В.
ГВУЗ «НГУ»
Кузьменко М. Ю.
НМетАУ

Крячко А. П.
НПО «Днепрчерметавтоматика»

Система автоматизированного управления раскромом проката на непрерывном мелкосортном стане

В статье предлагается система автоматизированного управления раскромом проката на непрерывном мелкосортном стане благодаря которой обеспечивается увеличение выхода мерного металлопроката и автоматически учитывает выработку калибров валков при прокатке. Ил. 1. Библиогр.: 3 назв.

Ключевые слова: мелкосортный стан, управление, заготовка, временной интервал, датчик

Automatic control system for rolling stock pattern cutting on the continuous light-section mill, thanks to which, there provided increase of output of measured metal stock and automatically considers capacity of roll pass while rolling is suggested in the article.

Keywords: light-section mill, control, die, time gap

Непрерывные мелкосортные станы являются основными технологическими линиями для производства сортового проката на металлургических заводах.

При поставке проката в прутках стандартами оговариваются требования к их длине. В зависимости от длины прутков, различают два основных вида продукции:

- мерный прокат со стержнями одинаковой длины, оговоренной условиями заказа;
- немерный прокат, содержащий стержни разной длины в заданных пределах.

В настоящее время практически все крупные заказы на мелкосортный прокат в стержнях приходится на мерный прокат со стержнями длиной 12 м.

Однако стопроцентный выход мерного проката затруднен в силу влияния ряда факторов. К ним относятся: размеры исходной заготовки и готового профиля, параметры технологического процесса прокатки, порезка раската на прут-

ки и дальнейшая их обработка, управляемость оборудования стана и др.

Совершенствование способов и систем раскромки с целью повышения точности раскромки проката обеспечивает значительное увеличение выхода мерного товарного проката, который можно реализовать по максимальной стоимости.

Цель работы

Создание автоматизированной системы управления раскромки проката на непрерывном мелкосортном стане, выпускающей на холодильник прутки только кратные мерному стержню и автоматически учитывающей выработку калибров валков при прокатке.

Результаты работы

При разработке системы использовали опыт, накопленный в этой области НПП «Днепрчерметавтоматика», Институтом черной металлургии, Национальной металлургической академией Украины, учли лучшие решения по прогнозированию длины раската и примене-