

А.К.Тараканов, В.П.Ивашенко, С.В.Бобровицкий

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА

Национальная металлургическая академия Украины

Приведено краткое описание математических моделей, предназначенных для автоматизированного поиска оптимальных режимов работы доменных печей и агрегатов жидкофазного восстановления железа. Показаны возможности расчётного анализа эффективности процессов жидкофазного восстановления.

Модели для автоматизированного поиска оптимальных режимов работы доменных печей.

Автоматизированный поиск оптимальных режимов работы доменных печей является в настоящее время наиболее важным и актуальным направлением в автоматизации управления доменным процессом.

Доменный процесс представляет собой сложную многофакторную систему, качество функционирования которой определяется как внешними условиями (составом шихты, параметрами дутья, конструктивными особенностями оборудования печи), так и технологическими аспектами доменной плавки (методами управления тепловым, шлаковым, газодинамическим режимами плавки), что требует комплексной оптимизации доменного процесса.

В настоящее время каждому металлургическому предприятию приходится самостоятельно решать вопросы оптимизации состава шихты, в том числе и по экономическим критериям, оценивать рациональность использования различных добавок к дутью, определять стратегию дальнейшего совершенствования доменной технологии. С другой стороны, менее стабильные внешние условия плавки приводят всё чаще к значительным отклонениям текущих технологических режимов работы доменных печей от оптимальных. Поэтому в современных условиях резко возросла потребность в использовании автоматизированных систем комплексной оптимизации условий работы доменных печей и методов оперативного управления технологическим режимом доменной плавки.

Для облегчения решения названной проблемы в Национальной металлургической академии Украины разработана диалоговая система «ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР ДОМЕНЩИКА», предназначенная для автоматизированного поиска рациональных в конкретных условиях плавки базовых режимов работы доменной печи, выполнения основных технологических расчётов, повышения квалификации операторов-технологов.

Система реализуется на базе персонального компьютера, не требует наличия устройств связи с объектом (доменной печью), ориентирована на

пользователя–технолога, не имеющего больших навыков работы с ЭВМ. Использование системы позволяет технологу–доменщику путём проведения модельных и технологических расчётов эффективно приближать текущие режимы плавки к оптимальным для данных условий и этим реализовывать наиболее значительный резерв улучшения технико–экономических показателей работы доменных печей за счёт технологических мероприятий. Система открывает перспективы быстрого расширения использования ЭВМ, расчётных методик и математических моделей в доменном производстве. Приведём краткую характеристику функций основных её подсистем:

Подсистема «ШИХТА» осуществляет расчётный поиск такого состава рудной части шихты, который с учётом показателей качества и цены каждого потенциально наличного материала, а также влияния качества шихты на расход кокса обеспечивает минимальную себестоимость выплавляемого чугуна и при этом удовлетворяет всем накладываемым пользователем ограничениям.

Подсистема «ЗАГРУЗКА» обеспечивает математическое моделирование загрузки шихтовых материалов в доменную печь при использовании различных модификаций конусных и бесконусных загрузочных устройств, расчёт расположения слоёв шихты, значений рудных нагрузок на кокс и основности шихты в заданных кольцевых зонах колошника.

Подсистема «ШЛАК» позволяет производить с помощью математической модели оценку основных свойств шлака заданного состава, а также осуществляет автоматизированный выбор состава шихты из имеющихся материалов для достижения заданной основности и оптимизации свойств шлака.

Подсистема «ДУТЬЁ» реализует расчёт по заданным параметрам дутья комплексных технологических параметров дутьевого режима доменной плавки (теоретической температуры горения топлива, скорости истечения дутья, мощности потока дутья, полной энергии горнового газа, объёма образующегося за минуту фурменного газа), а также производит расчётный выбор значений параметров дутья, обеспечивающих поддержание группы комплексных параметров на заданном оптимальном уровне.

Подсистема «РАСЧЁТ» позволяет производить расчёты: задувочных шихт; текущих показателей работы доменной печи; приведенных к одинаковым условиям производительности печи и удельного расхода кокса.

Подсистема «ТРЕНАЖЁР» обеспечивает правдоподобную имитацию в ускоренном масштабе времени технологического режима плавки любой доменной печи, работающей в конкретных условиях, и позволяет вырабатывать у технологов единообразные правильные подходы к оперативному управлению тепловым и газодинамическим режимами доменной плавки.

Программы диалоговой системы являются унифицированными, однако требуют адаптации некоторых математических моделей к условиям

работы конкретных доменных печей и корректировки используемой нормативно-справочной информации.

Использование разработанных программ возможно, прежде всего, технологами на доменных печах, что позволяет значительно расширить возможности расчётного анализа параметров плавки мастерами и газовщиками печей и повысить уровень их квалификации.

Важными и полезными эти программы могут быть для руководителей доменных цехов и технических служб металлургических предприятий, поскольку они дают возможность анализировать и обоснованно выбирать наиболее рациональные условия и режимы работы доменных печей.

В учебном процессе при подготовке или повышении квалификации специалистов-металлургов использование программ диалоговой системы «Персональный компьютер доменщика» позволяет индивидуализировать, конкретизировать и значительно углубить изучение вопросов, связанных с технологией доменной плавки.

Модели для выбора оптимальной технологии жидкофазного восстановления железа

Процессы жидкофазного восстановления железа (ПЖВ), хотя и не вышли пока на стадию промышленного использования, имеют реальную перспективу заменить в будущем частично или полностью традиционную коксо-агло-доменную технологию, поскольку имеют перед ней неоспоримые преимущества. Эти процессы не требуют дефицитного коксующегося угля, природного газа и окускованного железорудного сырья и могут перерабатывать безо всяких ограничений любые техногенные отходы, хотя наиболее перспективным сырьём является железорудный концентрат. Кроме качественного чугуна, процессы жидкофазного восстановления дают возможность вырабатывать в значительном количестве электроэнергию, что главным образом и обеспечивает более низкую себестоимость выплавляемого чугуна по сравнению с чугуном доменным [1–3].

Организация процессов жидкофазного восстановления сводится к следующему. Железосодержащие материалы подаются в шлаковую ванну самотеком или вдуваются газом. Они растворяются в шлаке. Оксиды железа восстанавливаются из шлака углеродом угля, который также подается в ванну самотеком или вдувается. Для интенсификации тепло- и массообмена осуществляют барботаж шлаковой ванны окислительным газом, который вдувают под поверхность шлака. Из шлакового расплава выделяется газ, содержащий CO и H₂. Газ дожигается верхним дутьем. Теплота дожигания в наибольшей мере обеспечивает теплопотребность процессов, идущих в шлаковой ванне. Ключевым элементом эффективной организации процесса является активный теплообмен между зоной дожигания и шлаковой ванной.

В процессах типа Romelt u Ausiron, где весь уголь подаётся на поверхность шлака, основная его масса остаётся в поверхностном слое шла-

ковой ванны. Лишь мелкие частицы угля вовлекаются при барботаже шлака в основной объём шлаковой ванны [4]. При этом поддержание высокой температуры в реакционной зоне за счёт сжигания части угля в кислородном барботажном дутье в глубине шлаковой ванны нереально, хотя это и декларируется авторами процесса Romelt [5,6]. Во всплывающие пузыри воздуха могут вытесняться из шлака кусочки не смачиваемого им угля, но за 1–3 секунды времени всплывания пузыря уголь может сгореть лишь в очень небольшой степени.

В процессе HSmelt кусковый уголь не подаётся в шлаковую ванну. Пылеугольное топливо вдувается вместе с железорудными материалами в чугун, обеспечивая его активное науглероживание [7]. Восстановление железа здесь идёт за счёт углерода чугуна не в микрообъёмах на поверхности кусочков угля, а в контролируемой реакционной зоне, формируемой при продувке. Благодаря этому, интенсивность восстановления возрастает, а процесс становится устойчивым и более управляемым, хотя достигается это за счёт усложнения не только подготовки угля и железорудной шихты, но также конструкции агрегата и условий его эксплуатации.

К настоящему времени практически все разумные варианты реализации процессов жидкофазного восстановления не только предложены, но и испытаны в виде крупномасштабных полупромышленных установок. Анализ результатов испытаний различных процессов, опубликованных в литературе, наши собственные аналитические расчёты на основе балансов и математических моделей, а также выявленные количественные ограничения для каждого из процессов позволяют обосновать для любых конкретных условий оптимальную конструкцию агрегата ПЖВ и оптимальную технологическую схему процесса.

В качестве критерия оптимизации можно использовать удельное энергопотребление на выплавку чугуна, но поскольку ПЖВ обеспечивает выработку значительного количества электроэнергии, наиболее логичным и естественным показателем для решения оптимизационной задачи является себестоимость чугуна с ограничениями по объёму капиталовложений.

Выбор оптимального режима базируется на математической модели процесса жидкофазного восстановления. Разработанная в НМетАУ модель построена на материальном и тепловом балансах процесса. Поскольку главным в модели является расчёт требуемого расхода угля на выплавку единицы чугуна, ключевой элемент модели – это анализ тепловой работы агрегата ПЖВ. Для универсализации модели предусматривается возможность использования нагретого дутья и подачи угля как на поверхность шлака, так и в глубину шлаковой ванны в виде пылеугольного топлива совместно с окислителем. Кроме того, для обеспечения возможности практически полного дожигания в рабочем пространстве агрегата ПЖВ угля, подаваемого на поверхность шлака, в случае, если заданная степень

дожигания превышает 70% (это предельно возможная степень дожигания топлива в однованных агрегатах типа Romelt и Ausiron) предусматривается переход на моделирование ПЖВ в двухванном агрегате. При этом первая по ходу шихты ванна предназначена для плавления и частичного восстановления железорудных материалов при полном дожигании отходящих газов, а вторая ванна, куда подаётся уголь, – для окончательного восстановления до железа за счёт углерода угля с частичным дожиганием выделяющихся газов. Возможность предварительного нагрева и сушки шихты не предусматривается, поскольку такой вариант, как показали наши проработки и расчёты, является технически слишком сложным и экономически нецелесообразным.

Моделирование начинается с расчёта удельного расхода шихты по балансу железа, а также количества и состава первичного расплава. Затем рассчитывается зональный тепловой дефицит процесса, включая затраты теплоты на испарение и нагрев влаги шихты и топлива, на восстановление углеродом оксидов железа, на нагрев до заданных температур шлака и чугуна.

Удельный расход угля на выплавку чугуна вычисляется по балансу теплоты с учётом дополнительного расхода углерода угля на восстановление оксидов железа и науглероживание чугуна, а также возможного уноса угольной пыли с дымовыми газами. Баланс теплоты учитывает теплосодержание нагретого дутья, унос теплоты отходящими газами и, естественно, потери теплоты на охлаждение агрегата. На каждом этапе горения рассчитываются состав образующихся газов и химическая теплота продуктов неполного горения. Суммарное теплосодержание отходящего дыма (физическое + химическое) используется в дальнейшем для расчёта количества вырабатываемой электроэнергии. КПД электрогенерирующего комплекса принимается, исходя из расчёта возможности использования парогазового цикла в связи с составом отходящего газа.

Результаты решения задачи выбора оптимальных параметров процесса жидкофазного восстановления железа зависят главным образом от накладываемых ограничений и соотношения цен на различные энергоносители. На рис. 1–6 показаны для примера результаты расчёта себестоимости чугуна, выплавляемого по технологии, близкой к технологиям Romelt и Ausiron, при использовании железорудного концентрата, концентрата тощих углей, разделяемого на фракции и частично вдуваемого в шлак, а также нагретого дутья. Варьирование значений отдельных параметров осуществлялось здесь при поддержании на постоянном базовом уровне значений других параметров, в частности: степени дожигания газа в рабочем пространстве печи 0,5; температуры дутья 1000 °С; содержания кислорода в дутье 21%. Диапазон изменения расхода угля для всех просчитанных вариантов составил от 740 кг/т чугуна до 1100 кг/т чугуна.

Влияние на себестоимость чугуна вида железорудного сырья – не очень существенное в условиях Украины. Себестоимость выплавляемого

чугуна при использовании почти бесплатных шламов оказывается даже несколько выше, чем при использовании железорудных концентратов, так как экономия на сырье значительно перекрывается стоимостью угля, расходуемого в большем количестве из-за более высокого удельного выхода шлака и большей влажности шламов.

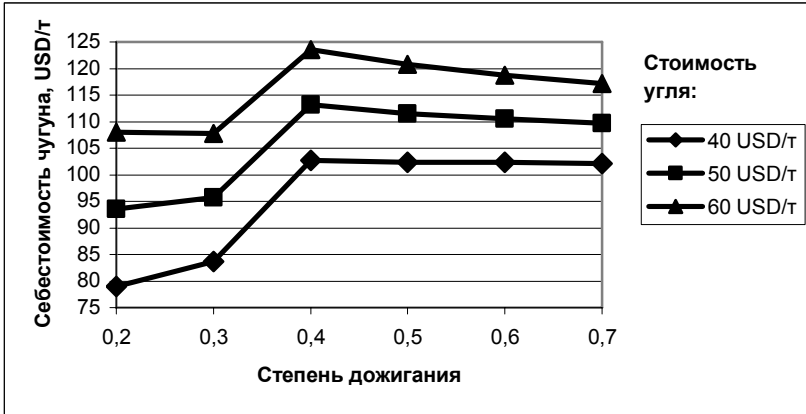


Рис.1. Зависимость себестоимости чугуна от степени дожига газа в рабочем пространстве агрегата ПЖВ при разных ценах на уголь

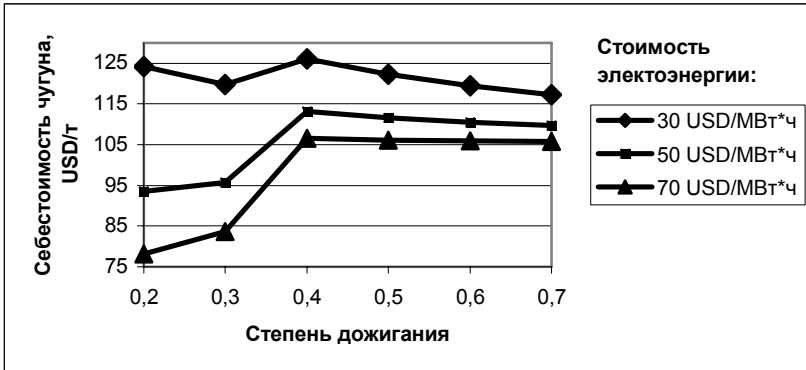


Рис.2. Зависимость себестоимости чугуна от степени дожига газа в рабочем пространстве агрегата ПЖВ при разных ценах на электроэнергию

При существующем в настоящее время соотношении цен на уголь и электроэнергию снижение степени дожига газа в рабочем пространстве агрегата от 0.4 до минимально допустимого и повышение концентрации кислорода в горячем дутье от 23 % до 25 % значительно понижают

потенциальную себестоимость чугуна в связи с возможным при этом переходе с парового на парогазовый цикл производства электроэнергии.



Рис.3. Зависимость себестоимости чугуна от содержания кислорода в дутье при разных ценах на электроэнергию

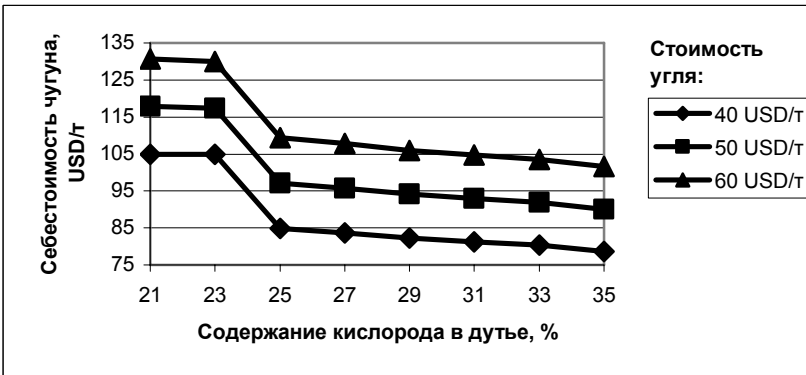


Рис.4. Зависимость себестоимости чугуна от содержания кислорода в дутье при разных ценах на уголь

При существенном снижении цены на вырабатываемую электроэнергию, что неизбежно, если её продавать электрораспределяющим компаниям, а не потреблять на собственные нужды, сокращая тем самым расход покупной электроэнергии, повышение концентрации кислорода в дутье и изменение степени дожигания газа слабо влияют на себестоимость чугуна.

Увеличение температуры дутья экономически выгодно при любых ситуациях. При этом снижение себестоимости чугуна больше при высокой

цене на уголь (рис.5) и при низкой цене на вырабатываемую электроэнергию (рис.6).

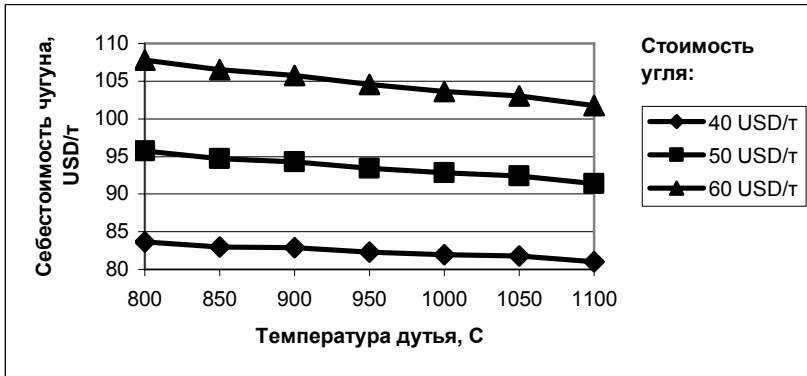


Рис.5. Зависимость себестоимости чугуна от температуры дутья при разных ценах на уголь

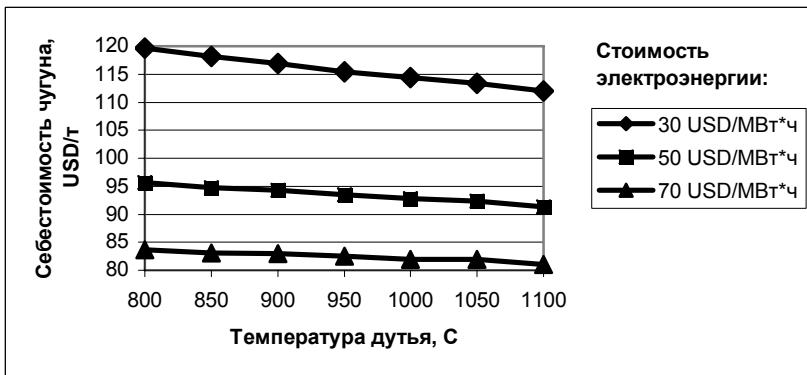


Рис.6. Зависимость себестоимости чугуна от температуры дутья при разных ценах на электроэнергию

Работа агрегатов жидкофазного восстановления может быть максимально эффективной рядом с доменными печами, так как в этом случае можно легко осуществить нагрев дутья за счёт доменного газа, что позволяет существенно уменьшить удельный расход угля и в значительной мере сократить расход технического кислорода.

Минимизировать капитальные затраты на создание промышленных агрегатов жидкофазного восстановления железа можно, если строить их на базе выводимых из эксплуатации неэффективных доменных печей с

максимальным использованием их инфраструктуры: воздуходувок, воздухопроводов, газопроводов, воздухонагревателей, литейных дворов, газоочисток, шихтоподач, железнодорожных путей, а также электрогенерирующих мощностей ТЭЦ. Вполне возможно в конструкциях агрегата ПЖВ ограничиться использованием в основном существующего хорошо освоенного оборудования доменных печей и кислородных конвертеров.

Выводы

1. Диалоговые системы, созданные на основе математического моделирования отдельных сторон доменного процесса, обеспечивают возможность приближения текущих режимов доменной плавки к оптимальным.

2. Модельные расчёты доказывают, что в условиях Украины выплавка чугуна в агрегатах жидкофазного восстановления – значительно выгоднее, чем в доменных печах.

3. Наиболее рациональным является освоение технологии жидкофазного восстановления железа в действующих доменных цехах при использовании доменного газа для нагрева дутья и практически всей инфраструктуры выводимых из эксплуатации доменных печей.

1. *Роменец В.А.* Новые перспективы производства металла: состояние и перспективы //Металлург. – 2001. – №11. – С.30–38.
2. *Курунов И.Ф., Савчук Н.А.* Состояние и перспективы безкоксовой металлургии железа. – М.: Черметинформация, 2002. – 198 с.
3. *Тараканов А.К., Иващенко В.П.* Тенденции и перспективы развития производства чугуна в Украине //Сталь. – 2002. – №8. – С.13–16.
4. *Поведение угля в шлаковой ванне печи Ромелт / А.В.Баласанов, А.Б.Усачёв, В.Е.Лехерзак и др.* // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия.– 1999.– №7.– С.12–17.
5. *Роменец В.А.* Процесс жидкофазного восстановления железа: разработка и реализация // Сталь. – 1990. – №8. – С.20–27.
6. *Исследование системы шлак–уголь–металл в печи Ромелт / А.Б.Усачёв, А.В.Баласанов, В.Е.Лехерзак и др.* // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 1997. – №11. – С.6–9.
7. *Bates P., Coard A.* Hismelt, the future in ironmaking technology. Proceedings of the 4-th European Coke and Ironmaking Congress – June 19–22, 2000. – Paris, France. –Vol.2. – P.597–602.

Сведения об авторах:

Тараканов Аркадий Константинович, докт.техн.наук., профессор, заведующий кафедрой металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины;

Иващенко Валерий Петрович, докт.техн.наук, профессор, Первый проректор Национальной металлургической академии Украины