

УДК 669.162.2:621.317.38.004

В.Н.Ковшов, В.В.Бочка, Е.И.Сулименко, В.А.Петренко**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СБЕРЕЖЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ***Национальная металлургическая академия Украины*

Приведены данные об энергетических ресурсах и их расходовании при производстве чугуна. Предложены возможные пути экономии кокса за счет применения сфероидизированной стабилизации агломерата, применения гибридного сырья и железоблюса. Предложена технология повышения температуры дутья и освещены некоторые нетрадиционные методы интенсификации доменного процесса.

Энергия – одна из важнейших потребностей любого производства. Решение любой задачи экономического или технического развития немыслимо без затрат энергии и энергоресурсов.

Энергетические ресурсы делятся на две главные категории – возобновляемые и невозобновляемые. К невозобновляемым энергетическим ресурсам относятся углеводородные топлива – уголь, горючие сланцы, торф, нефть, природный газ и ядерное топливо. По американским данным экономически рентабельные запасы топлива в США будут истощены через 50–75 лет, а общие потенциальные запасы – через 120–170 лет. К вышеизложенному следует добавить, что сжигание всех видов топлива сопровождается интенсивным загрязнением окружающей среды [1].

К возобновляемым энергетическим ресурсам относятся энергия фотосинтеза, энергия прямого использования солнечных лучей, гидроэнергия, энергия приливов и волн, энергия процессов испарения и выпадения осадков, ветровая, тепловая энергия, основанная на разности температур между атмосферой и поверхностью суши и воды, геотермальная энергия и др. В чёрной металлургии значительную часть энергии, которая теряется при производстве черных металлов, можно утилизировать и использовать в качестве вторичного тепла.

На рис. 1 (данные чл. кор. АНУ Ефименко Г.Г.) приведены изменения температуры продуктов черной металлургии в процессе их производства и использования на металлургическом заводе полного цикла. Как видно из рисунка, довольно значительную часть теплоты можно использовать в технологических целях, например, высокую температуру готового кокса и агломерата. При этом, ресурсы тепла, которые можно утилизировать, ориентировочно составят следующие величины:

- при агломерации 0,348–1,74 ГДж (0,083–0,415 Гкал) на 1 т продукта;
- при коксовании 2,32 ГДж (0,554 Гкал) на одну тонну кокса;
- на одну тонну чугуна 3,5 ГДж (0,834 Гкал);

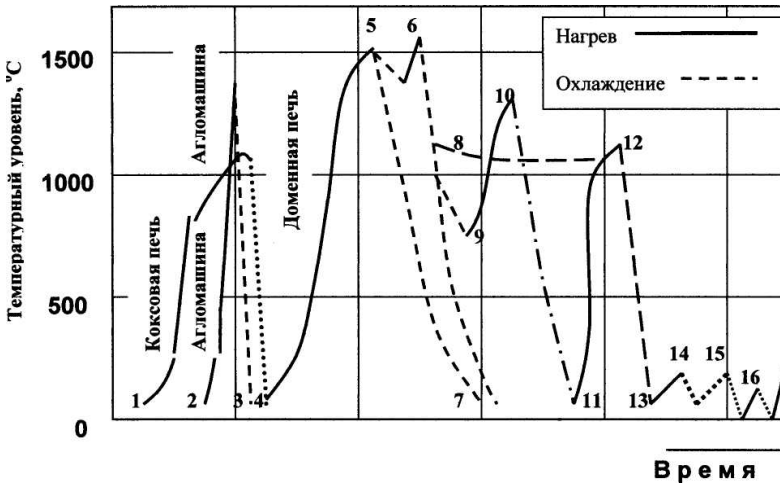


Рис. 1. Схема температурных колебаний на металлургическом заводе с законченным производственным циклом (с полосовым прокатным станом). 1 – уголь, 2 – мелкая руда, 3 – агломерат, 4 – кокс, 5 – жидкий чугун, 6 – жидкая сталь, 7 – чугуновая заготовка, 8 – установка непрерывной разливки, 9 – слиток, 10 – нагревательный колодец, 11 – сляб, 12 – нагревательная печь, 13 – горячекатаная полоса, 14 – травление, 15 – холодная прокатка, 16 – электроочистка.

Подсчитано, что при осуществлении технологических циклов «доменная печь – кислородный конвертор» и «доменная печь – мартеновская печь» до проката, включая разливку стали, количество утилизированной теплоты может составить 9,28 ГДж на одну тонну готового проката. При степени утилизации 50% может быть сэкономлено около 10% общего количества энергии в этих технологических операциях.

Заметное снижение энергозатрат, как видно из рис.1, связано с изобретением непрерывной разливки стали, так как отпала необходимость в дополнительном нагреве слитков при прокатке. Это позволило сэкономить 1,36 ГДж теплоты на тонну проката. Аналогичные решения возможны и при производстве кокса, агломерата и выплавке чугуна.

Кокс выталкивают из коксовой печи с температурой выше 1100°C с охлаждением его в коксотушильной башне и на рампе до температуры окружающей среды, теряя, таким образом, большое количество энергии. Агломерат в конце процесса спекания имеет температуру около 1000°C, а в доменный цех приходит холодным. Примерно столько же энергии теряется и при охлаждении окатышей. Таким образом, если использовать эти потери в доменном процессе, то можно сэкономить значительное количество энергоресурсов.

Затраты и потери энергии в доменном производстве

Процесс производства чугуна потребляет больше половины всей энергии, необходимой для производства готового проката. На выплавку

чугуна расходуется кокс, природный газ и энергетические затраты: электрическая энергия, идущая в основном на привод двигателей загрузки, перекидки клапанов, освещение, дутье, кислород, природный газ для кауперов, пар, вода для охлаждения, сжатый воздух и газоочистка.

Основную часть энергии (около 80%) доменное производство получает от кокса. Теряется энергия с колошниковым газом, с горячими чугуном и шлаком, с охлаждением печи, с дымовыми газами при нагревании воздухонагревателей и с повышенным давлением газа под колошником. Основные потери энергии происходят с жидким чугуном. Однако чисто потери при транспортировке чугуна составляют примерно 150–200 градусов: $(150 \dots 200) * 0,9 * 1000 = 0,135 \dots 0,180$ ГДж/т чугуна. Остальное тепло используется при сталеплавильном переделе. Эти потери можно уменьшать за счет укрытия чугунных желобов на литейном дворе, применения чугунно-ковшовых емкостей большей ёмкости с лучшей тепловой изоляцией и с крышками. Крышки для желобов и ковшей могут быть снабжены специальными устройствами для переработки тепловой энергии в электрическую (например, термоэлектрические преобразователи).

При производстве товарного чугуна на разливающих машинах происходит полная потеря всего тепла чугуна при охлаждении «чушек», что требует принятия мер для её утилизации.

Шлаковые чаши транспортируют горячий шлак на грануляционные бассейны и шлаковые отвалы при помощи электровозов или других тягловых средств, а это дополнительные расходы. При оснащении чаш индивидуальными средствами трансформации высокотемпературного тепла (1400–1500⁰С) в электрическую энергию позволит уменьшить расходы на эти операции.

Использование тепловой энергии шлаков во время транспортировки для обжига известняка позволит ликвидировать дорогостоящие установки для его обжига.

Нагретую воду в грануляционной установке аккумулировать и использовать для бытовых нужд. Аналогичные предложения возможны и для операций охлаждения доменной печи и колошникового газа.

При нагреве воздухонагревателей в дымовых боровах можно устроить змеевики, с циркулирующей по ним водой с превращением последней в пар высоких параметров, который применять для нужд доменного цеха.

Потери теплоты от спонтанного колебания теплового состояния доменной печи можно уменьшить, применив анализаторы шихтовых материалов в потоке и использовать регулирование хода печи методами оптимизации с использованием вычислительной техники.

Применение предлагаемых приёмов утилизации теплоты позволят 30–50% потерь вернуть в производство, что составит 1,4 –2,3 ГДж на тонну чугуна. Очевидно, что использование этой энергии в доменном процессе позволит сэкономить значительное количество теплоты. Эти соображения позволили предложить схему комплексного процесса, позволяющего ис-

пользовать тепло, теряемое между процессами подготовки сырья и доменным.

Тандем процесс. В тандем процессе участвуют две доменные печи. Первую доменную печь загружают горячим сырьём (горячий агломерат и кокс), исключают зону косвенного восстановления путём снижения уровня засыпи до достижения температуры газа выше 950°C и вдувают в печь дутьё с большим количеством природного газа (или другого с высоким восстановительным потенциалом) и кислорода. В результате получается горячий восстановительный газ с температурой более 900°C , который по газопроводу транспортируется во вторую, соседнюю доменную печь вместе с колошниковой пылью. Вторая печь работает в обычном режиме.

В первой доменной печи теряется косвенное восстановление, из-за чего увеличивается расход кокса ориентировочно на 200 – 250 кг/т чугуна. Зато во второй печи используется большее количество бросовой энергии и экономится дополнительное при усилении непрямого восстановления.

Достоинство тандем-процесса. Кокс выталкивают из коксовой печи с температурой выше 1373 К, остужают его в коксотушильной башне и на рампе до температуры окружающей среды, теряя, таким образом, $1373 * 1,5 = 2,06$ ГДж энергии (здесь 1,5 кДж/кг*К – теплоемкость кокса при температуре 1373 К) на тонну кокса.

Агломерат в конце процесса спекания имеет температуру около 1273 К, а в доменный цех приходит холодным, значит теряется энергии $1273 * 1,05 = 1,34$ ГДж (1,05 кДж/кг*К – теплоемкость агломерата при этой температуре) на тонну агломерата. Примерно столько же энергии теряется и при охлаждении окатышей. Таким образом, применение в доменной печи этой энергии, экономит $2,06 * 0,5 + 1,34 * 1,8 = 3,442$ ГДж энергии на тонну чугуна (0,5 и 1,8 – расход кокса и агломерата на тонну чугуна соответственно), что соответствует $3,442 * 100 / 14,51 = 23,72\%$ или около 120 кг кокса. Вдувание природного газа в первую печь (около $250 \text{ м}^3/\text{т}$ с соответствующей компенсацией кислородом) экономит около 130 кг/т кокса, следовательно, в первой печи расход кокса будет исходным (около 500 кг/т).

Отпадает необходимость сложных устройств для охлаждения и сортировки кокса и железосодержащего сырья. Экономится кокс в первой печи за счет вдувания газообразного топлива. Во второй доменной печи экономится кокс за счет вдувания горячего, не содержащего CO_2 , колошникового газа из первой печи. Расход кокса ориентировочно снижается на 20–30% (100 –150 кг/т чугуна) и повышается производительность на 7 – 11% [2].

Нет необходимости нагревать большое количество дутья на вторую доменную печь – снижение затрат на нагрев дутья (около 20 кг/т кокса). Нет затрат на очистку колошникового газа у первой доменной печи. Это примерно 1,5 кг/т чугуна. Улучшается ровность хода первой печи (экономия кокса более 2%); нет необходимости рационально распределять ших-

товые материалы по поперечному сечению колошника – упрощается конструкция загрузочного устройства (снижаются капитальные затраты).

В колошниковой пыли содержится 40–55% железа и около 15% кокса, что даст экономию кокса при выходе колошниковой пыли 50 кг/т, около 5 кг/т. Общая экономия кокса на две печи составит ориентировочно около 150 кг/т чугуна и снижение капитальных затрат на газоочистку, воздухонагреватели и загрузочные устройства.

Кроме экономии энергии между переделами (коксохимическим, агломерационным и доменным) в самом доменном процессе в настоящее время есть достаточно большие резервы.

Анализ доменного процесса показывает, что максимальные затраты энергии в процессе плавки чугуна приходятся на восстановление оксидов, меньшие – на разложение карбонатов рудных и флюсовых, переход серы в шлак разложение влаги дутья и пр.

В настоящее время существует несколько путей экономии энергозатрат при выплавке чугуна в доменных печах.

1. Уменьшение затрат энергии на восстановление оксидов: увеличение степени косвенного восстановления (рациональное газораспределение, увеличение количества восстановительных газов); ослабление внутренних связей восстанавливаемых оксидов (электричество, ультразвук, гамма облучение, катализаторы и пр.).

2. Уменьшение потерь с разложением карбонатов, переходом серы в шлак и разложением влаги дутья.

3. Уменьшение теплотеря через кладку печи.

4. Возвращение части тепла, уносимого чугуном, шлаком и газом.

5. Частичная замена дорогого энергоносителя (кокса) на более дешевые виды (природный, коксовый и генераторный газы, мазут, пылеугольное топливо, гранулированная пластмасса и др.).

6. Стабилизация технологического режима по времени.

Эти пути реализуются различными способами, так называемыми методами интенсификации, которые можно поделить на традиционные, используемые и совершенствуемые в настоящее время, и нетрадиционные, которые в настоящее время не используются или используются частично, но будут использоваться в будущем.

К традиционным относятся следующие методы интенсификации:

- подготовка железорудных материалов к доменной плавке;
- нагрев дутья;
- увлажнение дутья;
- обогащение дутья кислородом;
- вдувание в доменную печь углеродсодержащих добавок;
- комбинированное дутье;
- вдувание в доменную печь горячих восстановительных газов;
- повышенное давление газа в доменной печи;
- внедоменная обработка жидкого чугуна;

- оптимизация процессов доменной плавки;
- автоматическое управление доменной плавкой.

Проанализируем некоторые из перечисленных методов интенсификации с точки зрения расширения их теоретических и практических возможностей по снижению энергозатрат.

Подготовка железорудных материалов.

Подготовленное сырье для доменной плавки (агломерат, окатыши и пр.) изменяет теплотребление процесса в следующих направлениях: увеличивает содержание железа, что напрямую сказывается на производительности и расходе кокса; увеличивает газопроницаемость шихты, чем создает благоприятные условия для увеличения производительности и лучшего распределения и использования газового потока; уменьшает теплотраты на разложение карбонатов, удаление гидратной влаги, улучшает восстановимость шихты и условия шлакообразования.

Уменьшение мелочи фракции 0 – 5 мм в окускованных материалах (агломерате и окатышах) с 20 до 5% снижает расход кокса на 4,5% и увеличивает производительность на 6%, что происходит за счет рационального взаимораспределения шихты и газа в верхней части доменной печи (выравнивание газовых нагрузок по радиусу) и повышения общей газопроницаемости в доменной печи [2].

Опыт подготовки агломерата в виде одностадийного дробления и грохочения на стационарных и самобалансных грохотах показал, что, даже в условиях использования технологических приемов по повышению прочностных свойств спека, не удастся уменьшить содержание мелочи в нем ниже 14–20 %.

Исследования показали необходимо перейти на производство стабилизированного агломерата крупностью 3–30 мм с обязательной сфероидизацией частиц. Одновременно с этим появится возможность подвергнуть сфероидизации и выделяемому в возврат фракцию 0–3 мм, что позволит полностью её вывести из состава агломерата транспортируемого в доменный цех. Благодаря такой подготовке имеется реальная возможность снизить косвенные затраты на транспортировку этой мелочи, улавливания пыли, выделения шламов и обеспечить значимый экономический эффект. Ожидается, что при использовании стабилизированного агломерата снижение расхода топлива на выплавку чугуна сократится на 25–30 кг/т чугуна.

В качестве альтернативы агломерата и окатышей может быть гибридное окускованное сырье, являющееся продуктом технологии, использующей лучшие параметры технологии агломерации и окатышей [3]. В ее основе заложена концепция формирования конечного гранулометрического состава гибридного окускованного сырья еще на предварительных стадиях его производства. Получение гранул крупностью 5–10 мм и межчастичное расположение твердого топлива крупностью 0–10 мм позволяет осуществить адресное расположение крупных гранул топлива в зоне по-

вышенного его потребления. Спекание такой шихты по технологии, осуществляемой на обжиговой машине, которая включает предварительную ее сушку с последующим спеканием по агломерационной технологии и охлаждении при продувке воздуха на заключительной стадии процесса, позволяет при минимизации энергозатрат на процесс спекания (40–45 кг/т) осуществить термообработку спека блоков за счёт тепла от горения крупных фракций топлива. Технология позволяет получить гибридное сырьё в виде спеченных блоков прошедших точечное припекание в местах контакта гранул шихты. Подвергнутое после схода с машины гибридное сырьё грохочению не требует дополнительной механической обработки. Особенностью гибридного окускованного сырья является наличие в центре гранулы реликтового магнетита концентрата, что способствует интенсификации восстановительных процессов в доменных печах при снижении энергозатрат и, прежде всего, – расхода кокса. Анализ применения гибридного окускованного сырья при выплавке чугуна подтвердил, что по своему гранулометрическому составу оно близко к стабилизированному агломерату и даже при наличии 7–8 % мелочи крупностью 0–5 мм приводит к увеличению производительности на 1.1 % и снижению расхода топлива на 4.4 кг/т [4].

Применение низкофлюсованных окатышей в современной доменной шихте требует добавок флюса – сырого известняка в количества 100 – 200 кг/т чугуна, что потребует увеличить расход кокса на 5–10%. В этом случае возможно применение вместо известняка комплексного флюса (железофлюса), спеченного из концентрата и известняка, основностью 5–7 единиц. Такой флюс, кроме повышенной основности, содержит 30–40% железа и обладает высокой прочностью. Примерный химический состав комплексного флюса следующий: $\text{CaO} = 43\%$; $\text{SiO}_2 = 7,2\%$; $\text{Fe} = 35\%$; $\text{FeO} = 45\%$. Применение повышенного количества окатышей снижает расход кокса за счет повышения содержания железа, комплексный флюс тоже снижает расход кокса, необходимый для разложения сырого известняка и за счет повышенного содержания железа.

Приведём приблизительный расчёт при применении комплексного флюса. При расходе железорудной составляющей 1800 кг/т чугуна (60% агломерата и 40% окатышей, 67 кг/т известняка) со средним содержанием железа в железорудной шихте 56% и удельном расходе кокса 500 кг/т, общее содержание железа (включая известняк) следующее: $1800 * 56 / (1800 + 67) \approx 54\%$. При том же расходе железорудной шихты и 84 кг/т чугуна комплексного флюса вместо 67 кг/т известняка, содержание железа в общей шихте будет следующее: $(1800 * 0,56 + 84 * 0,35) * 100 / (1800 + 84) \approx 55\%$. Увеличение количества железа в шихте на 1% снижает удельный расход кокса тоже на 1%. При выводе 10 кг/т сырого известняка из шихты расход кокса снижается на 0,5%, значит, при выводе 67 кг/т известняка экономится кокса $67 * 0,5 / 10 = 3,35\%$. Общее снижение расхо-

да кокса за счет повышения содержания железа и вывода известняка из шихты составит:

$$1 + 3,35 = 4,35\%, \text{ или } 500 * 0,0435 = 21,75 \text{ кг.}$$

Ориентировочная экономия кокса составит 3–5%, в зависимости от расхода окатышей в шихте.

Железофлюс можно вводить и в агломерационную шихту вместо сырого известняка. Ввод железофлюса предотвращает образование в агломерате включений свободного (не прореагировавшего) оксида кальция, гашение которого влагой воздуха сопровождается увеличением объема, что приводит к постепенному разрушению агломерата при длительном его хранении. Оно способствует также получению мелкопористого, менее оплавленного и более восстановимого агломерата [5].

Нагрев воздушного дутья.

Нагрев дутья можно повысить до 1500⁰С и выше насколько может выдержать воздухопровод горячего дутья. Теоретически, нагрев дутья возможен до теоретической температуры горения в зонах горения. Повышение нагрева дутья возможно, если часть объема газообразного топлива (природного или другого высококалорийного газа) сжигается в воздухопроводе горячего дутья и в виде гомогенизированной смеси воздуха дутья и продуктов горения подаётся в рабочее пространство доменной печи. При этом доля объема сжигаемого в воздухопроводе газообразного топлива по мере снижения температуры горячего дутья из воздухонагревателей пропорционально увеличивается с одновременным снижением его расхода, подаваемого в фурменный прибор, таким образом, что общий расход газа на доменную печь сохраняется.

Предложенная технология введения газообразного топлива в доменную печь позволяет осуществить его сжигание без подмешивания к горячему дутью холодного воздуха с получением максимальной температуры. Введение части объема газообразного топлива позволяет решать проблему смешивания продуктов горения и воздуха близко к идеальному, поскольку воздухопроводы горячего дутья и кольцевой выполняют роль камеры смешивания. Полное перемешивание продуктов горения газообразного топлива и воздуха дутья обеспечивает пропорционирование «газообразное топливо – воздух дутья» по фурмам в автоматическом режиме с исчезновением необходимости создания сложных систем контроля расхода воздуха и регулирования расхода газообразного топлива.

Возможны варианты подвода газообразного топлива в подкупольное пространство воздухонагревателей и в поднасадочное устройство. Это позволяет эксплуатировать воздухонагреватель в сходящем режиме без добавки на его обогрев к колошниковому газу природного, за счет компенсации потерь температуры дутья, при охлаждении воздухонагревателя, увеличением соотношения газообразного топлива в воздухопровод, например, 40–60% при сохранении объема воздуха на постоянном уровне. Доменная печь может работать на двух воздухонагревателях попеременно.

но. Третий воздухонагреватель не нужен вследствие того, что дутьевой период можно продолжить за счет сжигания природного, или любого другого, газа в подкупольном пространстве каупера, стоящего на дутье, или в горячем воздухопроводе. Это обстоятельство позволит значительно повысить экономию газообразного топлива и кокса. Реализация этого способа позволит снизить расход кокса на 10–12% и более.

Нетрадиционные энергетические ресурсы.

Широкие возможности открываются с внедрением в доменный процесс нетрадиционных видов энергетических ресурсов. Вдувание в фурмы доменной печи гранулированных пластмасс по немецкой технологии позволяет не только экономить кокс, но и решает проблемы экологии, так как сжигание бытовых пластмассовых отходов в доменной печи не загрязняет окружающую среду.

Обработка железорудных материалов гамма-излучением, применение дешёвых катализаторов, ультразвука позволяет значительно увеличить их восстановимость (на 30% и выше).

Наши исследования и анализ полученных данных свидетельствует об интенсификации восстановительных процессов при вводе электроэнергии в низкотемпературную часть доменной печи. Так увеличение силы тока до 8,23А способствовало увеличению степени использования газового потока с 12% до 17,6%, что привело к росту степени восстановления железорудного материала с 48,8% до 54,7% [6]. Электрический ток, проходя сквозь железорудный материал, ослабляет внутренние связи в оксидах железа и таким путём активизирует восстановительные процессы.

Выводы

1. Приведены данные об энергетических ресурсах и их расходовании в чёрной металлургии на производство чугуна.
2. Проанализированы возможности минимизации потерь тепловой энергии при производстве чугуна и транспортировке жидких и газообразных продуктов плавки.
3. Предложен тандем-процесс на основе работы двух доменных печей, позволяющий экономить около 150 кг кокса на тонну чугуна.
4. Проанализированы традиционные методы интенсификации доменной плавки с целью определения возможностей расширения их диапазона.
5. Обоснована возможность экономии кокса в доменной плавке за счет применения сфероидизированной стабилизации агломерата, применения гибридного сырья и железофлюса.
6. Предложена технология повышения нагрева дутья за счёт сжигания высококалорийного газа в воздухопроводе горячего дутья.
7. Намечены пути использования нетрадиционных видов энергоресурсов в доменном производстве.

1. *Лисин В.С., Юсфин Ю.С.* Ресурсо–экологические проблемы XXI века и металлургия. – М.: Высшая школа, 1998. – 447 с.
2. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
3. *Способ* производства гибридного окускованного сырья / С.Е. Сулименко, Н.В. Игнатов, Б.А. Нижегородов и др. Патент Украины № 31 693 А Бюл.
4. *Особенности* работы печи на шихте, содержащей гибридное окускованное сырье /В.Н.Ковшов, В.В.Бочка, Е.И.Сулименко и др. //Теория и практика металлургии. – 2001. – №5 – С.3–7.
5. *Абрамов О.В., Хорбенко И.Г., Швецла Ш.* Ультразвуковая обработка материалов. – М: Машиностроение, 1984. – С.39–41.
6. *Петренко В.А.* Интенсификация процессов газодинамики и массообмена в доменной плавке. – Днепропетровск: Институт технологии, 2000. – 272с.

Сведения о докладчике:

Ковшов Владимир Николаевич, *д.т.н., профессор кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины*