

В.И.Большаков, Н.М.Можаренко, Л.Г.Тубольцев, Г.Н.Голубых

**НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ
БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ
В СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ**

Изложен опыт задувки и выдувки доменных печей, являющийся основой для определения влияния технологических, технических и организационных факторов на обеспечение безопасной эксплуатации доменных печей в переходных режимах. Исследования выполнены в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Ресурс».

Анализ состояния проблемы

Тенденции развития современного доменного производства в XXI веке нацелены, как и раньше, на сокращение расхода кокса, увеличение единичной и удельной производительности доменных печей (ДП) и длительности их кампаний. В последние десятилетия все большее внимание уделяется продлению кампании ДП за счет применения различных технических, организационных и технологических мероприятий.

Опыт эксплуатации доменных печей в стационарных режимах показывает, что продолжительность кампаний и производительность ДП определяется уровнем технологии и технического оснащения. Под этими определениями необходимо понимать следующие составляющие: сырьевые условия плавки (качество кокса и железосодержащих материалов); рациональность технологии (режимов загрузки и газодутьевого режима); интенсивность плавки; эффективность используемых систем охлаждения; качество огнеупоров, используемых для футеровки печи; рациональность параметров проектного профиля; техника и технология выпуска продуктов плавки; производительность печи, продолжительность и частота простоев печи; состояние и надежность несущих конструкций и основного технологического оборудования.

Из всех технологических операций, которые выполняются на доменных печах, наиболее аварийно опасными и наименее изученными и регламентированными являются задувка и выдувка печей. За последнее время на доменных печах Украины и России участились случаи аварий при их работе в нестационарных режимах, к которым относятся пуско–остановочные операции. Основными причинами этого являются снижение профессионального уровня, технологической дисциплины и эксплуатационного состояния доменных печей. Поэтому перед учеными стоит задача анализа причин аварий и разработки правил безопасной работы печей при задувке, остановке и выдувке, а технологический персонал доменного цеха должен тщательно подготавливать и аккуратно

исполнять регламент пусковых и остановочных операций в соответствии с соответствующими Технологическими инструкциями, заранее составленными планами организации работ (ПОР) и инструкциями, обеспечивающими эксплуатационную безопасность и технологическую устойчивость доменных печей при выдувках и задувках.

Увеличение срока службы металлоприемника, контроль его состояния

При оценке продолжительности кампании ДП одним из главных ее критериев является состояние металлоприемника, рабочая поверхность футеровки которого подвергается воздействию следующих негативных факторов [1]:

- термическим напряжениям, обусловленным резкими перепадами температур в кладке;
- проникновению чугуна в кладку печи и эрозии ее потоком агрессивных жидких продуктов плавки;
- проникновению в футеровку доменной печи щелочей, цинка и других агрессивных веществ;
- использование недостаточно совершенной техники выпуска продуктов плавки;
- работа доменных печей с использованием шихтовых материалов не отвечающим требованиям доменной плавки.

Воздействие чугуна и шлака на футеровку металлоприемника активизируется при неудовлетворительном состоянии его дренажной способности, периферийном ходе печи и при повышенной интенсивности доменной плавки. Негативное влияние на футеровку металлоприемника оказывают и похолодания, особенно «глубокие». В этом случае в горн доменной печи поступает большое количество неподготовленных железосодержащих материалов и шлака с повышенным содержанием FeO и MnO, что приводит к повышению уровня восстановления железа и марганца углеродом футеровки металлоприемника печи и ее активному размыванию. Практика эксплуатации доменных печей показывает, что наиболее щадящие условия службы их футеровки обеспечиваются при соблюдении ровного и устойчивого хода печи, рационального теплового и шлакового режимов плавки и надежной работы системы охлаждения.

В значительной степени отрицательное воздействие на состояние футеровки оказывают эрозионные явления. Одним из главных факторов, определяющих степень инфильтрации чугуна и шлака в футеровку, является пористость огнеупоров. Установлено, что если диаметр пор углеродистого блока превышает 1 мкм, то расплав чугуна проникает в поры, а это приводит к снижению механической прочности и охрупчиванию поверхностного контактного слоя углеродистой футеровки и резкому изменению его физико-химических свойств.

Одной из важных причин износа углеродистой футеровки

металлоприемника доменной печи является ее взаимодействие с чугуном, в процессе которого может происходить растворение углерода футеровки в железосодержащем расплаве. Комплексным показателем агрессивности чугуна по отношению к углеродистой футеровке является степень насыщения чугуна углеродом. В результате исследований, выполненных на ДП-9 «Криворожстали», установлено, что для обеспечения стойкости футеровки горна и лещади доменной печи необходимо поддерживать текущее содержание углерода в чугуне на уровне 4,45–4,50% [1]. Снижение же указанной концентрации углерода на 0,25–0,30% в чугуне приводит к резкому увеличению «моющей» способности чугуна. Поэтому для предотвращения износа футеровки металлоприемника необходимо, помимо контроля температуры кладки, тепловых нагрузок в системе периферийного охлаждения и температуры жидких продуктов плавки контролировать химический состав чугуна, в частности, содержание в нем углерода. В системе автоматизированного контроля «Горн», разработанной в Институте черной металлургии НАН Украины (ИЧМ), степень насыщения чугуна углеродом контролируется отношением реального содержания углерода в чугуне к предельно растворимому, что позволяет своевременно уменьшать агрессивность чугуна посредством повышения теплового потенциала металлоприемника [2].

С целью своевременного определения необходимости проведения текущих и капитальных ремонтов доменных печей в ИЧМ разработан метод контроля состояния кладки горна и лещади по температурному полю и тепловому потоку, которые контролируются специальными датчиками, состоящими из групп термопар и комплекса средств автоматизации (система «Разгар»). Основанные на использовании этого метода, системы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника, установлены на ДП-2 «Запорожстали», ДП-5,6,8 и 9 «Криворожстали». Информация о состоянии системы периферийного охлаждения и остаточной толщины футеровки горна и лещади представляется в виде отчетов и видеокладов для технологического персонала на экране компьютера [1].

В объеме целевой комплексной программы НАН Украины «Ресурс» Институтом черной металлургии разработана система контроля шлакового режима «Контроль», прошедшая промышленное испытание в условиях работы ДП-5,6 и 9 «Криворожстали». Установлено также, что при высоких температурах разрушение огнеупоров происходит при их взаимодействии с доменными шлаками при образовании легкоплавких соединений и растворения огнеупоров. Коррозионному воздействию шлака на огнеупорную кладку предшествует прилипание и проникновение шлакового расплава вглубь огнеупоров. Модели прогнозирования свойств железуглеродистых и шлаковых расплавов на основе параметров межатомного взаимодействия использованы в качестве критериев стабилизации процесса доменной плавки и безопасного

функционирования доменной печи. В результате разработана система «Контроль», которая обеспечивает оперативный прогноз технологических свойств шлака, в результате чего достигается устойчивое развитие газодинамических процессов в нижней части шахты, заплечиках и в фурменной зоне, дренажа жидких продуктов плавки, повышение его сульфидной емкости и, как следствие, это способствует повышению качества продуктов плавки.

Уменьшение износа шахты доменной печи

Обеспечение стойкости шахт доменных печей является многофакторной задачей и определяется газодинамическим режимом работы печи, теплотехническими характеристиками системы охлаждения, физико-химическими свойствами огнеупоров, температурно-тепловыми условиями пристенной зоны, параметрами загрузки, агрессивностью зоны первичного шлакообразования и уровнем содержания щелочей и цинка в шихтовых материалах. Одним из основных факторов определяющих стойкость футеровки является уровень агрессивности первичных шлаков. Для решения задачи повышения стойкости шахты, также в значительной мере определяющей продолжительность кампании и безопасной эксплуатации ДП, Институтом черной металлургии выполнены исследования процессов взаимодействия первичных, промежуточных и конечных шлаковых и железоуглеродистых расплавов из железорудных материалов различного состава с огнеупорами марки ШПД для условий доменной плавки «Криворожстали». Результаты исследований взаимодействия первичных шлаковых расплавов с футеровкой показали, что для температур 1340–1380⁰С зона взаимодействия огнеупорного оксидного материала с расплавом из высокоосновного агломерата Новокриворожского ГОКа–2 ограничивается 1–2 мм, толщина реакционной зоны 0,2–0,3 мм. При проплавке агломерата собственного производства (основность 1,15) глубина проникновения расплава в огнеупорный материал 2–3 мм, толщина реакционной зоны 0,25–0,40 мм. Обогащенный шлак, применяемый в шихте ДП–9, внедряется в огнеупоры на глубину 4–5 мм. Расплав же из смеси собственного агломерата и обогащенного шлака (80%:20% и 90%:10%) проникает в футеровку на глубину 1–2 и 3–4 мм соответственно.

Высокозакисный расплав из частично восстановленных окатышей в зоне температур 1300–1350⁰С внедряется в футеровку на глубину 1–2 мм при толщине контактной зоны 0,2–0,4 мм, а при более высоких температурах 1450–1500⁰С глубина проникновения увеличивается до 6–12 мм. Максимальную агрессивность по отношению к шамоту имеют первичные шлаковые расплавы из окатышей Северного ГОКа.

Таким образом, исследованиями было установлено, что стойкость футеровки шахт доменных печей из окисных огнеупоров типа ШПД–39, ШПД–41 и ШПД–43 при взаимодействии с железосодержащими

материалами в значительной мере определяется температурой расплава, степени их восстановленности, минералогической структуры и наличием в первичном шлаке щелочных и цинковых соединений.

Вторым фактором, определяющим стойкость футеровки шахты печи и заплечиков, является режим загрузки. Результаты исследований распределения шихтовых материалов перед задувками и в процессе эксплуатации доменных печей, выполненных ИЧМ, позволили сформулировать ряд дополнительных, принципиально новых, технологических положений по выбору рациональных режимов загрузки доменных печей. Использование этих разработок позволяет повысить стойкость футеровки шахт и заплечиков доменных печей за счет ограничения содержания оксида железа (FeO) в первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавах пристенной зоны не выше 15–20%. Для реализации этих технологических положений содержание низкоосновных окатышей в шихте, выгружаемой в периферийную зону, не должно превышать 6,5–7,0%. Кроме того, повышение стойкости футеровки ДП достигается ограничением интенсивности периферийного потока газа в сочетании с выбором свойств железосодержащей смеси (агломерат+окатыши), соответствующих температурно-тепловым условиям периферийной зоны. Это обеспечивается, во-первых, установленной последовательностью выдачи железосодержащих материалов с необходимыми физико-химическими свойствами на сборный конвейер или в весовой бункер (воронку) при скиповой загрузке. Во-вторых, при выгрузке порции материалов из загрузочного устройства на поверхность засыпи колошника следует формировать необходимое соотношение этих материалов в смеси пристенной зоны. То есть при загрузке в печь порция, содержащая окатыши, должна состоять, как минимум, из двух частей, отличающихся составом компонентов: головной части без окатышей и смешанной, содержащей окатыши. Головная часть, поступающая в бункер бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) первой или сверху первого скипа, обеспечивает в начальном периоде выгрузки материалов на поверхность засыпи колошника преобладание компонента, составляющего головную часть порции, что ограничивает попадание окатышей на периферию поверхности засыпи. Смешанная часть порции должна обеспечивать предотвращение формирования обособленных массивов окатышей на остальной площади колошника, что способствует повышению устойчивости хода доменной печи.

В ходе выполнения работ по программе «Ресурс» ИЧМ для определения и реализации рациональной массы головной части порции разработаны математическая модель истечения шихтовых материалов из бункера БЗУ или при загрузке печи типовым конусным аппаратом, предложения по изменению алгоритма формирования смешанных железосодержащих порций и соответствующее программное обеспечение, опробованное в составе действующей АСУ ТП [3].

Выдувка доменных печей на капитальные ремонты.

Остановка доменных печей на капитальные ремонты 1–го, 2–го и 3–го разрядов обуславливается как техническим и технологическим состоянием непосредственно центрального узла – самой доменной печи, так и состоянием его технологических объектов и оборудования. Все работы по остановкам ДП с частичной или полной их выдувкой должны соответствовать правилам безопасности [4]. Вывод из эксплуатации ДП на капитальные ремонты 1–го и 2–го разрядов сопровождается полной их выдувкой с выпуском «козлового» чугуна. Выдувка доменных печей, особенно печей большого объема (3000–5500 м³), представляет собой ответственную и сложную операцию, которая должна быть тщательно подготовлена и требует от эксплуатационного персонала определенных производственных и технологических навыков, четкого понимания природы явлений и процессов происходящих в объеме печи в этот период. Учитывая сложность и ответственность процесса выведения всех без исключения доменных печей из эксплуатации, особенно печей большого объема, непосредственно в цехе и во всех подразделениях предприятия, связанных с работой доменного цеха, производится тщательная подготовка по обеспечению успешного выполнения этого технологического мероприятия.

Необходимость выдувки и категория капитального ремонта печи определяется специально созданной комиссией с привлечением ведущих специалистов отрасли и предприятия. На основании рекомендаций специалистов комиссии определяется срок остановки печи на капитальный ремонт, о чем издается приказ по предприятию. На основании этого приказа начальник доменного цеха разрабатывает план остановки печи, в котором должны быть отражены подготовительные мероприятия, выполняемые до остановки, во время выдувки и остановки печи с назначением лиц, ответственных за выполнение каждого мероприятия плана.

План остановки печи утверждает главный инженер–технический директор предприятия. Начальники доменного и других цехов, ответственных в утвержденном плане на остановку печи, разрабатывают план мероприятий с назначением ответственных лиц за проведение работ, что оформляется протоколом.

В соответствии с планом работ доменная печь, воздухонагреватели, шихтоподача и другие агрегаты и оборудование к моменту остановки печи должны быть очищенными и готовыми к передаче ремонтному персоналу по акту. Этот этап подготовки очень важен по условиям обеспечения безопасности выполнения ремонтно–монтажных работ.

В подготовительном периоде большое внимание уделяется техническому состоянию системы охлаждения печи. Доменные печи, оснащенные испарительным охлаждением, перед выдувкой (не позднее чем за 3–7 сут) обязательно переводятся на водяное. Вся система

охлаждения печи проверяется на герметичность. На холодильники, имеющие дефекты прекращается подача воды, заменяются неисправные воздушные фурмы и амбразуры. В зависимости от состояния печи, за 2–3 суток до ее выдувки печь останавливают для открытия воздушных фурм. В этом же периоде необходимо обеспечить тщательный контроль состояния системы охлаждения. При наличии дефектных холодильников шахты последние отключаются, а дефектные воздушные фурмы заменяются. Неконтролируемое попадание воды в печь недопустимо, особенно во время выдувки. При наличии компримированного азота в энергетических коммуникациях цеха необходимо обеспечить его подключение к коллектору природного газа, к штуцерам отбора статического давления в шахте печи, к трубам газоотборных машин и к специально указанным форсункам для подачи воды в печь. Не позднее чем за 10 суток до начала выдувки печи выполняется промывка горна. Традиционно для промывки горна, согласно Типовой технологической инструкции Минчермета СССР, применялся сварочный шлак. В последние 15–20 лет широкое распространение для промывок горна получил конвертерный шлак. Однако использование конвертерного шлака при промывках горна требует повышенного внимания к стойкости чугунных леток ввиду высокой агрессивности этого моющего материала. В качестве примера следует привести промывку конвертерным шлаком горна ДП–5 ОАО «Северсталь» в июне 2006 г. На третьи сутки работы печи с промывкой горна при увеличении расхода конвертерного шлака от 9,1 кг/т чугуна до 30,6 кг/т чугуна длина леток уменьшилась практически на один метр. Это снизило эксплуатационную устойчивость доменной печи и потребовало дополнительных мер для устранения этого негативного явления.

Технологическая устойчивость работы печи непосредственно перед выдувкой, тщательность исполнения подготовительных мероприятий к выдувке и остановке являются основой успешного проведения всего процесса выдувки ДП. Непосредственно в ходе выдувки недопустимы прогары фурменных приборов и остановки на их замену.

За сутки до начала выдувки печи на капитальные ремонты 1–го и 2–го разрядов необходимо обеспечить повышенное устойчивое тепловое состояние печи с содержанием кремния в чугуне 0,9–1,0%. Выдувку ДП разрешается начинать только при ровном ходе печи, устойчивом содержании кремния в чугуне, физическом его нагреве на уровне 1450–1500°C и соответствии с утвержденным планом, обработкой продуктов плавки.

Теоретические проработки развития процессов в рабочем пространстве печей в ходе их полной выдувки и проверка их в реальных условиях на ДП–9 «Криворожстали» и ДП–3,5 «Северстали» показали, что работа печей в этот весьма сложный для управления период должна выполняться при повышенных теоретических температурах (T_1) в

пределах 2200–2300⁰С. Такой уровень T_1 способствует увеличению реакционной способности окислительной зоны, что, во-первых, значительно уменьшает возможность попадания кислорода из фурменной зоны в освободившееся от шихты рабочее пространство печи и, во-вторых, снижает уровень температур по высоте столба шихты. Это, с одной стороны способствует повышению безопасности выдувки печи, а с другой, улучшает сход материалов.

В установленное графиком время начала выдувки и при обязательном условии обеспечения устойчивого хода печи прекращается загрузка рабочей шихты, после чего в печь загружается «холостой» кокс в количестве 9,0–12,0% полезного объема. С загрузкой первых «холостых» коксовых подач темп загрузки уменьшается, что создает условия для понижения уровня засыпи. Создание такой коксовой подушки на рабочей шихте является одной из основных мер, предотвращающей образование взрывоопасных условий при выдувке печи. После загрузки «холостых» коксовых подач прекращается вдувание природного газа и снижается давление газов на колошнике. Величина общего, нижнего и верхнего перепадов устанавливаются так, чтобы обеспечить постепенное, в соответствии с планом выдувки печи, опускание уровня поверхности шихты. Кроме того, принятый газодинамический режим выдувки печи в сочетании с расходом воды, подаваемой на охлаждение отходящих газов в рабочем пространстве печи должен обеспечить температуру газов не более 500⁰С.

Важной предупредительной мерой развития опасных ситуаций при выдувке печи является ведение постоянного контроля состава колошникового газа на содержание кислорода (O_2) и водорода (H_2). Предельно допустимые концентрации этих компонентов в отходящих газах должны быть не выше 2,0 и 10,0% соответственно. Отбор газа следует выполнять с интервалом по времени не более 20 мин. Каждая проба газа должна дублироваться. Это очень важно для подтверждения полученных значений по H_2 и O_2 , особенно для проб с предельными или превышающими предельные значения для этих компонентов. В отдельных случаях при выдувке печи при температуре газа на колошнике 450–550⁰С и при подаче воды в печь наблюдается резкое увеличение содержания водорода до 15–18% при содержании кислорода на уровне 0,2–0,3% (в пределах точности анализа для газоанализатора ВТИ–2). Газ с таким соотношением $O_2:H_2$ не является взрывоопасной смесью и не представляет опасности. Поэтому сменный технологический персонал, продолжая выполнять выдувку печи, должен принять меры к уменьшению содержания водорода до уровня менее 12% и температуры газов ниже 450⁰С путем уменьшения расхода и температуры дутья, установления рациональных газодинамических параметров – давления газов на колошнике, общего и частных перепадов, обеспечивающих устойчивый и ровный сход столба шихты. При этом оценивается уровень

расхода воды и, при необходимости, осуществляется его корректировка.

При отработке рационального и безопасного процесса выдувки печей на «Северстали» был установлен способ определения окончания выдувки печи, основанный на получении непрерывной информации о составе колошникового газа. По характеру кривых CO_2 , CO и H_2 можно достаточно точно определить как опускается шихта – ровно или с подстоями, а при достижении уровня засыпи 1,0–1,5 м происходит быстрое перераспределение содержания CO_2 и CO . Содержание CO уменьшается практически до 1,0–1,5 %, а CO_2 увеличивается до уровня горнового газа. Это однозначно свидетельствует об окончании процесса выдувки печи и обеспечивает ее безаварийное ведение. Последние выдувки ДП–5 полезным объемом 5500 м³ и ДП–3 полезным объемом 2000 м³ подтвердили высокую информативность этого способа.

Режимы дутья и загрузки шихтовых материалов должны обеспечивать постепенное опускание шихты, а температура газов на колошнике не должна превышать 500⁰С.

После загрузки в печь коксовых подач из пылеуловителя выпускают пыль, а перед отключением печи от общего газопровода его полностью очищают от пыли. После этого печь переводят на нормальное давление, уменьшают на 10–12% количество дутья и прекращают подачу в дутье природного газа, а подачу кислорода на обогащение дутья прекращают, когда уровень шихты достигнет уровня распара. Непосредственно после загрузки коксовых подач дается команда на подготовку «козловых» леток.

После выравнивания давления газа на колошнике с атмосферным, выполняют следующие операции:

отключают уравнительный газопровод, открывают на печи уравнительные клапаны и подвергают тщательной вентиляции с предварительной продувкой паром;

открывают атмосферные клапаны печи и пылеуловителя, отделяют печь от газовой сети секторной задвижкой, выключают подачу воды в скруббер, включают подачу пара под колошник, в пылеуловитель, газопровод и скруббер;

температуру колошника регулируют количеством подаваемой воды так, чтобы она не превышала 500⁰С;

количество дутья постепенно уменьшают по мере опускания столба шихты, так чтобы к концу выдувки уровень шихты достиг оси воздушных фурм, а избыточное давление дутья не превышало 0,25–0,3 ати;

контролируют уровень засыпи шихты с помощью зондовых или радиолокационных уровнемеров;

последний выпуск чугуна и шлака через чугунную летку производят при подходе уровня шихты к зоне заплечиков;

при потемнении фурм (что свидетельствует об отсутствии кокса на фурмах, т.е. завершении выдувки) избыточное давление дутья понижают до 0,1–0,15 ати, прекращают подачу воды в печь;

зажигают газ в печи и ведут тщательный контроль устойчивости его горения, в случае срыва пламени (прекращения горения газа) принимают меры по возобновлению его горения;

прекращают подачу газа в воздухонагреватели, перекрывают газопровод чистого газа, пропаривают его и тщательно вентилируют;

производят выпуск «козлового» чугуна через заранее подготовленную лотку, при выпуске «козлового» чугуна в печи поддерживается положительное давление газа для более полной выдачи чугуна;

после выдачи «козлового» чугуна сбрасывают рабочие сопла фурменных приборов и вместо них ставятся глухонные сопла для герметизации рабочего пространства печи, производится заливка воды в печь в количестве не менее трех объемов горна, вода в печи должна находиться не менее 5 час, и выпускаться из рабочего пространства печи по команде ответственного лица за выдувку печи;

остальные операции по остановке производят согласно инструкции.

Выдувка печи сопровождается опасностью образования взрывоопасной смеси газа и воздуха в освобождающемся рабочем объеме. В период выдувки возникают большие и резкие колебания давления газов в печи. Особенно опасное положение возникает в газовой системе при подвисяниях, осадках и обрывах шихты. Другим опасным фактором, сопровождающим выдувку, является подача воды в печь для охлаждения газов. Если вода вводится в печь только сосредоточенными струями, то масса шихты, охлаждаясь, затвердевает и закрепляется на стенках профиля печи, создавая угрозу обрывов и толчков в газовой системе.

Можно отметить следующие причины аварийных ситуаций при выдувках ДП [5,6]:

неправильное ведение выдувки, т.е. отсутствие технологической согласованности между количеством дутья, его давлением и уровнем засыпи;

недостаточное количество и давление пара в пылеуловителе для нейтрализации взрывоопасной смеси;

недопустимое ведение печи с обрывами на ходу и осадками;

недостаточный уровень выдувки шихты и ее заливки для охлаждения горна печи;

нарушение правил по надзору за состоянием системы охлаждения и предупреждения попадания воды в печь; прогар фурменных приборов;

недостаточный контроль за состоянием газовой атмосферы в рабочем пространстве печи над уровнем засыпи;

образование взрывоопасной смеси газа с воздухом;

отсутствие на доменных печах средств контроля, позволяющих определять по всей высоте шахты печи положение и скорость опускания уровня засыпи.

Сочетание дутьевого режима с контролем уровня шихты в печи, замеряемом на всем протяжении выдувки, необходимо для безопасного

ведения выдувки. Наиболее опасными являются режимы, когда при выдувке печи на капитальный ремонт 1-го разряда нарушается баланс между весом столба шихты и давлением дутья. Обычно в практике выдувок ДП для измерения положения уровня засыпи по всей высоте рабочего пространства применяют ручной способ (стальной канат с прикрепленным к нему грузом) и расчетный способ, основанный на оценке выгорания массы кокса в зависимости от расхода дутья. Установленные на ДП традиционные средства контроля уровня засыпи – механические зонды, позволяют контролировать положение опускающейся поверхности шихты до уровня 4–5 м от технологического нуля. При этом текущий контроль этого параметра, прогноз подвисаний и обрывов шихты, а также корректировка дутьевых и тепловых параметров невозможны. Для непрерывного контроля ровности схода шихты при выдувке ДП–9 «Криворожстали» в 2003 г. по рекомендации Института черной металлургии впервые в отечественной практике применен радиолокационный измеритель дальности, обеспечивший измерение скорости схода шихты на глубину более 30 м. Это позволило обеспечить безопасность интенсивной выдувки печи перед капитальным ремонтом 1-го разряда [7].

Задувка доменных печей

Вводу в эксплуатацию доменных печей после строительства, реконструкции и капитальных ремонтов 1-го, 2-го и 3-го разрядов, профилактических ремонтов и технологических остановок предшествует их задувка. Наиболее аварийно–опасными и ответственными являются задувки доменных печей после строительства, реконструкции и капитальных ремонтов 1-го и 2-го разрядов. Практика эксплуатации доменных печей в Украине, ближнем и дальнем зарубежье показывает, что успех задувки определяется техническим уровнем всех стадий отработанной на предприятии технологии, полноте ее исполнения, квалификации технологического персонала. От тщательного ее выполнения в значительной мере зависит продолжительность кампании ДП, а также ее безаварийная и высокопроизводительная работа. При задувках доменных печей необходимо: во–первых, сохранить футеровку горна и лещади, во–вторых, не допустить резкого повышения температуры в горне и образования взрывоопасной газовой смеси в газовых и воздушных коммуникациях. Перед задувкой ДП осуществляют проверку всего комплекса сооружений печи на плотность и прочность, опробование и регулировку механизмов и системы охлаждения, сушку огнеупорной кладки ДП и воздухонагревателей, технологически обоснованный выбор задувочной шихты, загрузку печи шихтовыми материалами.

Сушку огнеупорной футеровки печи и воздухонагревателей выполняют по утвержденному графику постепенным увеличением температуры в течение нескольких суток так, чтобы не нарушить

целостности огнеупорной кладки. Разогрев кладки при сушке печи позволяет избежать резкого повышения температуры поверхности футеровки в области горна и лещади после задувки. Наибольшее распространение получила сушка печи нагретым дутьем путем подачи его в печь через воздушные фурмы (значительно меньшее – коксовым газом и дровами). В отдельных случаях для сушки печи применяются спирали накаливания. Количество и температуру дутья поддерживают так, чтобы температура газа не превышала 450⁰С. Сушка воздухонагревателей производится раньше сушки ДП, так как для ее сушки необходим подъем температуры под куполом воздухонагревателей до 900–1000⁰С [8].

Загрузке доменной печи предшествует расчет задувочной шихты, основными параметрами которой являются:

- компонентный и химический состав шихтовых материалов;
- средняя рудная нагрузка задувочной шихты;
- расход кокса на тонну чугуна в задувочной шихте;
- содержание кремния в чугуне из задувочной шихты;
- основность конечного шлака;
- количество частных задувочных шихт.

При определении параметров задувочных шихт устанавливается порядок распределения частных шихт по высоте и распределение материалов шихт по сечению печи.

Как правило, расчет задувочной шихты выполняют на получение литейного чугуна, содержащего 3,0–4,0% Si, 0,3–0,8% Mn и <0,1% S. Рудные нагрузки задувочных шихт, на большинстве металлургических предприятий, принимают на уровне 0,40–0,55 т/т кокса. В последние 10–15 лет прогрессивные технологи пошли на увеличение этого параметра. На ряде заводов рудную нагрузку увеличили до 0,60–0,75 т/т кокса, что при рациональном распределении частных задувочных шихт по высоте и сечению печи обеспечивает высокую аккумуляцию тепла и значительную экономию кокса.

Задувочную шихту рассчитывают на большой расход кокса 2,2–2,5 т на 1 т чугуна вместо 0,6–0,7 т при выплавке литейного чугуна в нормальных условиях. Большой расход кокса в задувочной шихте вызывается необходимостью нагрева холодной футеровки печи и столба шихтовых материалов, а также повышенным расходом тепла на восстановление оксидов железа. Как правило, задувочная шихта состоит из 5–6 слоев шихт. Первые две шихты состоят только из кокса и небольшого количества флюса. В последующих шихтах по мере загрузки печи увеличивают количество железосодержащих материалов так, чтобы в последних порциях шихты расход кокса не превышал 1,2–1,3 т/т чугуна. На некоторых заводах Украины задувочная шихта состоит из двух отдельных шихт: первая шихта – только кокс и известняк, вторая – кокс, известняк, сортированная железная руда и марганцевая руда. Постепенное увеличение рудной нагрузки достигают изменением соотношения между

холостыми и содержащими руду подачами. К физико–химическим свойствам материалов, входящим в задувочную шихту, предъявляют повышенные требования. Кокс должен быть механически прочным (показатель $M_{40} > 82\%$). В задувочной шихте используют кусковую сравнительно бедную ($Fe = 45–50\%$), но легко восстанавливаемую гематитовую железную руду, для получения большего количества шлака (650–800 кг) на единицу чугуна с тем, чтобы улучшить его десульфурацию и обеспечить нормальный процесс восстановления в столбе шихты после задувки.

В последние годы в задувочных шихтах, практически на всех заводах Украины и стран СНГ в качестве основного железосодержащего материала используется агломерат текущего производства с основностью характерной для конкретного завода. Этот опыт показал, что задувка печи на агломерате значительно упрощает подготовку шихты и облегчает ведение печи в задувочном периоде. На некоторых металлургических предприятиях Украины, России, Японии при загрузке задуваемых ДП ниже горизонта фурм сооружают помост из бревен, который способствует побуждению схода материалов по мере выгорания кокса, прогреву металлоприемника горна и особенно околелеточного пространства, обеспечения равномерного распределения газового потока в нижних зонах рабочего пространства печи.

Специалисты (Японии и Италии) считают, что при составлении задувочной шихты на период первых часов работы ДП важнейшими параметрами являются масса и число коксовых подач, загруженных в печь на уровень воздушных фурм, и соотношение в шихте массы кокса и железорудной составляющей. В качестве главных критериев при расчете этих параметров принимается содержание кремния в чугуне первой плавки и его температура [9].

Перед задувкой ДП (после строительства или капитального ремонта 1–го разряда) при достижении верха шахты печи производится топографическое измерение профиля засыпи шихтовых материалов, что имеет важное значение для разработки режимов загрузки и управления распределением газов в печи. После загрузки проверяется готовность всех участков комплекса доменной печи. Затем дается разрешение технологическому персоналу печи на выполнение табельных операций по управлению задувкой печи. Подается команда на подачу пара во все взрывоопасные участки печи: под большой конус и в межконусное пространство, в шлюзовое пространство БЗУ и пылеуловители, подают воду во все охлаждаемые элементы фурменных и шлаковых приборов, а также систему охлаждения печи. Момент поступления горячего дутья в горн ДП считается началом ее задувки. Задувают печь через все фурмы. На некоторых заводах в первый период задувки для увеличения кинетической энергии дутья в фурмы вставляют керамические кольца, тем самым уменьшая их сечение, с целью отодвинуть фокус горения от

стен горна и предохранить кладку от действия высокой температуры. Однако широкого распространения такой прием не получил. То же достигается закрытием части фурм, что часто практикуется в странах СНГ и Японии [9].

Температура дутья в момент подачи его в горн составляет 700–800⁰С, начальный расход дутья в м³/мин численно равен примерно половине полезного объема печи. Через 20–30 мин после задувки, после достижения устойчивого горения кокса перед фурмами, расход дутья уменьшается, избыточное давление дутья устанавливается в пределах 0,15–0,30 ати. Этим достигается уменьшение интенсивности нагрева огнеупорной кладки и скорости опускания материалов в горн печи. О нормальном опускании шихтовых материалов свидетельствуют показания зондовых и радиолокационных уровнемеров шихты, в начальном периоде задувки первое увеличение количества дутья производят примерно через 6–8 ч работы так, чтобы давление горячего дутья возросло не более чем на 0,1 ати. В дальнейшем количество дутья увеличивают (при ровном ходе шихты) через каждые 3–4 ч на 50–100 м³/мин в зависимости от теплового состояния и хода ДП. Повышение температуры и увеличение количества дутья в раздувочный период должны производиться так, чтобы избежать подвисаний шихты. Частые подвисания и осадки шихты приведут к резкому похолоданию и загромождению горна, массовому горению воздушных фурм, затруднению выпуска жидких продуктов плавки, в результате чего раздувочный период может затянуться на несколько недель и оказать неблагоприятное влияние на всю кампанию ДП. При нормальной задувке первый чугун выпускают через 24–32 ч.

О накоплении продуктов плавки на уровне чугунных леток судят по характеру выхода газов из труб, установленных в каналах чугунных леток. Прекращение выхода газов из печи является сигналом для нормального закрытия леток леточными массами. При благоприятном протекании раздувочного периода количество дутья, численно равного $\approx 2V_n$, близкого к рабочему, достигают на 7–10 суток после задувки печи. В процессе раздувки печь постепенно переводят на повышенное давление, дутье обогащают кислородом, включают подачу углеводородсодержащих добавок к дутью. Проектной или плановой производительности печи достигают на 20–30 суток. К заводской газовой сети отходящих доменных газов печь подключают, когда давление газа на колошнике достигает уровня 150–200 мм вод.ст. [8]. Работа печи в раздувочном периоде на литейном чугуне длится 10–20 суток, что необходимо для надежного покрытия графитом футеровки горна. Этот прием существенно влияет на эксплуатационную стойкость металлоприемника и горна в целом.

Темп задувки печей малого и большого объема значительно отличаются. Термический удар на кладку печи, особенно горна, неизбежный при задувке, полное отсутствие гарнисажа, выделение из швов кладки остаточной влаги (установлено, что полный прогрев

периферийной зоны горна и лещади, со стабилизацией в них теплового режима, наступает после задувки в течение соответственно 6–10 и 25 сут) предопределяет особенности задувочного режима мощных доменных печей, который отличается от задувки печей малого объема. Отличие заключается в том, что доменные печи большого объема имеют значительно меньшую площадь фурменного кольца относительно площади горна, а расстояние от оси воздушных фурм до поверхности лещади намного больше. Поэтому ДП большого объема в течение первых 24 ч с момента задувки до первого выпуска плавки требуется разогревать более быстрыми темпами, чем это требуется при задувке печей малого и среднего объема. Однако в последние 10 лет практика показала, что доменные печи большого объема не должны задуваться с чрезмерно высокими темпами.

ИЧМ накоплен опыт задувки на ДП малого и среднего объема Украины и России с помощью нагретого азота [10]. В 2003 г. с использованием этой технологии была осуществлена задувка ДП–9 «Криворожстали» объемом 5000 м³ после капитального ремонта 1–го разряда [11]. Задувка доменной печи с использованием нагретого азота является устойчивой технологией, позволяющей эффективно сушить и прогреть столб шихты по высоте печи, формировать осевое газораспределение на печах разного объема, уменьшить расход кокса в период раздувки в среднем на 15%, получить физически прогретые жидкие продукты плавки (чугун, отвечающий требованиям технических условий на выплавку литейного чугуна). Сравнение результатов задувки ДП–9 «Криворожстали» [11] и ДП–3 Западно–Сибирского металлургического комбината [10] с использованием нагретого азота показало, что эта технология требует высокой степени готовности комплекса ДП, и особенно литейного двора, а также прогрева по высоте насадки воздухонагревателя и просушки азотопровода.

В настоящее время, в связи с проведением модернизации и капитальных ремонтов многих доменных печей Украины, России и стран СНГ, особую актуальность приобретают вопросы повышения промышленной безопасности, разработки технологических приемов и организационных мероприятий по обеспечению безаварийного вывода ДП на стационарный режим при вводе их в эксплуатацию. В момент задувки и в раздувочный период иногда возникают аварии со взрывами и пожарами, которые приводят к повреждениям и разрушениям конструкций печи, оборудования и газопроводов, значительному материальному ущербу, травмированию и гибели людей, загрязнению окружающей среды. Опасность возникновения взрывов усугубляется тем, что доменный газ в первые часы после задувки содержит повышенные количества водорода и оксида углерода. Особенно опасны в этот период обрывы шихты на ходу печи. Поэтому ровный ход печи в задувочный период важен не только для нормальной задувки, но и для

предотвращения опасности взрывов и пожаров. Анализ аварий, произошедших на ДП во время задувки, позволяет выделить основные причины их возникновения [5,6]:

- остановка печи с загроможденным горном;

- завышенная основность задувочной шихты из-за незнания химического состава агломерата и преждевременная перешихтовка в процессе раздувки;

- излишне форсированный дутьевой режим, повторенный неоднократно при загроможденном горне;

- несвоевременное обнаружение и отключение сгоревших холодильников;

- излишние высокие рудные нагрузки, принятые в первой задувочной шихте, поспешность с увеличением рудных нагрузок;

- сокращение раздувочного периода с излишней интенсивностью проплавления первого объема задувочной шихты при холодном горне;

- задувка при всех открытых фурмах и неправильном выборе газо-дутьевых параметров;

- потеря дренажной способности горна из-за неправильного режима раздувки, приводящего к горению фурм;

- непринятие мер к своевременному выпуску чугуна, приводящее к переполнению металлоприемника;

- прогар фурменных приборов;

- образование взрывоопасной смеси газа с воздухом;

- поступление воздуха в засыпной аппарат и пылеуловитель.

Опыт ИЧМ по технологическому сопровождению ДП показывает, что проведение полномасштабных комплексных предпусковых исследований и квалифицированное применение их результатов в значительной степени способствуют успешной задувке, сокращению раздувочного периода и ускоренному достижению проектных показателей плавки. Необходимый комплекс исследований, выполняемых перед задувкой, включает [7]:

- определение уровня и профиля засыпи шихты при загрузке в печь с помощью радиолокационного измерителя дальности, обеспечивающего измерение скорости схода шихты на глубину более 30 м;

- исследование расходных характеристик шихтовых затворов;

- исследование параметров потока шихты и последовательности выгрузки компонентов порций при различной структуре смешанных порций;

- определение границ и траекторий потока шихтовых материалов;

- определение толщины слоев рудных материалов с помощью вертикального зондирования и отбора проб, а также оценку деформации исходного слоя кокса после выгрузки порции рудных материалов;

- оценку распределения вида и гранулометрического состава шихтовых материалов на поверхности засыпи;

- определение погрешности реализации заданной программы загрузки;

уточненную оценку пропускной способности системы загрузки.

Разработанный комплекс технических и технологических решений [12] обеспечивает продолжительную безопасную работу ДП в стационарных условиях с использованием автоматизированных подсистем контроля разгара футеровки металлоприемника («Разгар»), контроля шлакового режима («Шлак») и содержания углерода в чугуне («Горн»); приемов формирования и загрузки порций шихтовых материалов, обеспечивающих повышение стойкости футеровки ДП.

Заключение

В рамках программы «Ресурс» Институтом черной металлургии по результатам исследований процессов, влияющих на интенсивность износа металлоприемника и шахты, изучены основные причины разрушения кладки доменной печи. Исходя из требований уменьшения разрушающего воздействия на футеровку печи, разработаны рекомендации по ограничению технологических параметров.

Выдувка ДП, и особенно печей большого объема, представляет собой ответственную и сложную операцию, которая имеет свои особенности в зависимости от вида предстоящего ремонта. Выдувка печи сопровождается опасностью образования взрывоопасной смеси газа и воздуха. В период выдувки при неправильной организации режима охлаждения рабочего пространства печи над поверхностью засыпи возникают большие и резкие колебания давления газов в печи. Особенно опасное положение возникает в газовой системе при подвисаниях, осадках и обрывах шихты. Для предотвращения взрывов необходимо выполнять изложенные в статье рекомендации.

Тщательная подготовка и четкая организация задувочного периода ДП в значительной степени определяет продолжительность ее кампании, а также безаварийную и высокопроизводительную работу печи. Технология задувочного режима мощных ДП, рассчитанных на работу с давлением газов на колошнике до 2,5 ати, имеет ряд отличительных особенностей, одной из которых является достаточно интенсивное увеличение количества дутья с первых часов после задувки, от чего в значительной мере зависит стойкость футеровки. С целью увеличения стойкости огнеупорной футеровки против растрескивания при тепловых нагрузках ДП перед их задувкой необходимо подвергать сушке. При составлении задувочной шихты важнейшими параметрами являются масса, число коксовых подач и величина рудной нагрузки.

Для быстрого и эффективного завершения пускового периода и выхода ДП на проектную производительность необходимо обеспечить рациональное распределение шихтовых материалов по сечению колошника. Для предотвращения разрушения футеровки во время задувки и последующей эксплуатации следует соблюдать рекомендации по уменьшению агрессивности первичных шлаков в периферийной зоне печи.

В первые часы задувки ДП существует опасность возникновения взрывов. Особенно опасны в этот период обрывы шихты на ходу печи. Поэтому ровный ход печи, контроль скорости схода шихты при выдувках печи и в задувочный период важны не только для нормальной задувки и выдувки, но и для предотвращения опасности возникновения взрывов.

1. *Доменное производство «Криворожстали»* / В.И.Большаков, А.В.Бородулин, Н.А.Гладков и др. – Дн–ск, Кривой Рог. – ИЧМ, «Криворожсталь». – 2004. – 348с.
2. *Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи* / Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Г.В.Панчоха и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ. Вып. 12. 2006. – С.77–84.
3. *Оценка технических возможностей управления распределением основности в доменной печи* / Н.Г.Иванча, В.И.Большаков, Т.П.Порубова, В.И.Вишняков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ. Вып. 13. 2006. – С.36–47.
4. *Правила безопасности в доменном производстве*. ПБ 11–542–03.
5. *Плискановский С.Т., Полтавец В.В.* неполадки в работе доменных печей. – Дн–ск: Пороги. – 2002. – 301с.
6. *Жеребин Б.Н., Пареньков А.Е.* неполадки и аварии в работе доменных печей. – Новокузнецк. – 2001. – 275с.
7. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – Киев: Наукова думка. – 2007. – 412с.
8. *Плискановский С.Т., Полтавец В.В.* Оборудование и эксплуатация доменных печей. – Дн–ск: Пороги. – 2004. – 495с.
9. *Кутнер С.М.* Технология задувки доменных печей за рубежом. – М. – 1984. – Обзорная информация. Ин–т «Черметинформация». – Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». – Вып.1. – 43с.
10. *Раздувка доменной печи с применением азота* / А.С. Янковский, М.Ф. Марьясов, А.В. Бородулин и др. // *Металлург.* – 1988. – №11. – С.29.
11. *Задувка доменной печи объемом 5000м³ с применением нагретого азота* / А.В.Бородулин, А.И.Васюченко, К.А.Дмитренко и др. // *Сталь.* – 2006. – №9. – С.6–9.
12. *Научно–технические решения по обеспечению продолжительной безопасной работы доменных печей* / В.И.Большаков, Н.Г.Иванча, А.С.Нестеров и др. // *Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”*. Збірник наукових праць за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. – ІЕС ім..Є.О.Патона НАН України. Київ. – 2006. – С.440–444.

Статья рекомендована к печати к.т.н. И.Г. Муравьевой