

УДК 669.162.001.5

**В.И.Большаков, Н.А.Гладков, И.Г.Муравьева, С.Т. Шулико,
В.В.Лебедь**

СТРУКТУРА НИЖНЕЙ ЧАСТИ СТОЛБА ШИХТЫ И РОЛЬ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЛАВКИ

Представлены структура столба шихтовых материалов в нижней части доменной печи и особенности элементов коксовой насадки. Рассмотрены строение и свойства «тотермана» и его роль в доменной плавке.

Состояние и поведение кокса в нижней части доменной печи, характер движения и направления его перемещения в сочетании с потоками продуктов плавки и другие динамические процессы обуславливают формирование в горне своеобразной структуры коксовой насадки, заметно влияющей на движение газов и дренаж жидких фаз, а также на их распределение по сечению горна, тесноту взаимодействия шлаковой и металлической масс и, следовательно, на развитие первичных и вторичных окислительно–восстановительных процессов, конечный состав чугуна и стойкость футеровки. Формирующаяся структура коксовой насадки определяется условиями работы печи, формой и геометрическими размерами фурменной зоны, режимом загрузки шихтовых материалов и качеством кокса, что в совокупности определяет эффективность использования газа в печи и экономичность плавки. При этом состояние коксовых масс в насадке существенно влияет на распределение газов и жидких фаз, что определяет необходимость осмысления процессов ее формирования и способов управления ее размерами и характеристиками. Роль формы, размеров и механизмов управления коксовой насадкой практически не изучены, что определяет целесообразность их исследования, логического и математического прогнозирования.

В литературе описано строение коксовой насадки в горне, зафиксированное после разборки затушенной доменной печи №4 японской фирмы Кукиока [1, 2]. Установлено (рис.1), что в насадке может быть выделено до десяти зон (I–X), отличающихся цветом (бурый, темный), крупностью (кусковый, мелочь), округлостью (окатанный) коксовых включений, а также зон кокса разной крупности в смеси с графитом, металлом и шлаком. Очерчена граница сосредоточения шлака в горне и верхний уровень накопления чугуна, контактирующего со шлаком и занимающего совместно с ним некоторый объем.

Исходя из сложившихся представлений о строении столба шихтовых материалов над уровнем фурм [2, 3], на рис.1 представлено изображение вертикального сечения доменной печи, разделенное на равновеликие по площади кольцевые области (зоны) лучами, по которым опускаются шихтовые материалы [3, 4], их состояние в области зоны плавления и наибо-

лее вероятное сочленение промежуточных зон с элементами известной структуры коксовой насадки ниже уровня фурм [1].

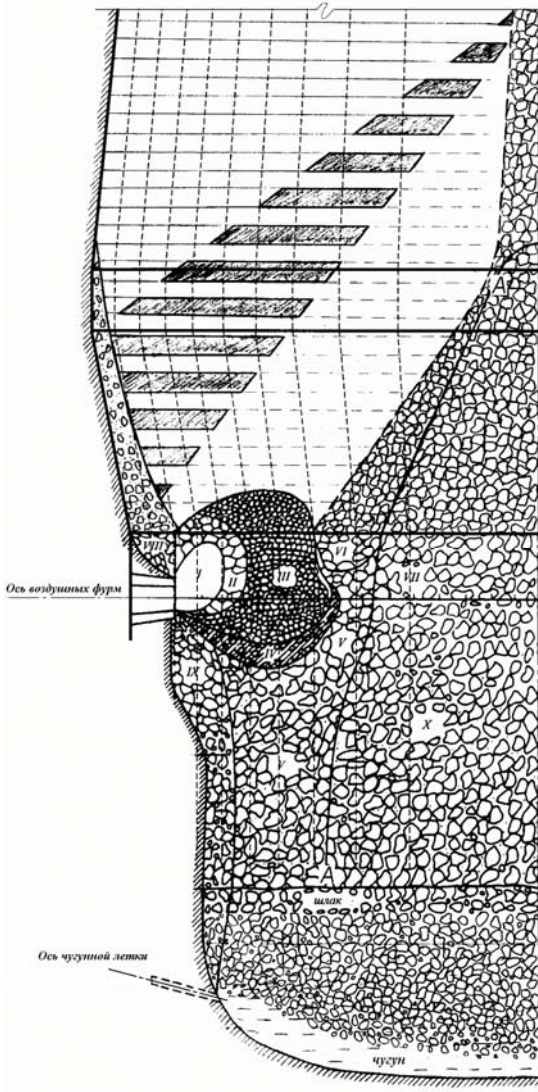


Рис.1. Структура нижней части столба материалов в доменной печи.

Анализ представленной на рис.1 схемы расположения материалов в печи позволяет заключить следующее. Из корня зоны когезии, примыкающего к заплечикам, отделяется и более активно, вследствие перегрева на периферии, стекает в металлоприемник чугуна. Шлаковая составляющая совместно с коксом среднего размера более интенсивно (из-за механического воздействия при движении вдоль стен шахты на кокс крупного размера и расходования образующейся мелочи на процессы прямого восстановления), чем в других зонах опускается вдоль стен горна (зона IX) в шлаковую и далее в металлическую ванну, постепенно разделяясь на жидкую (шлак) и твердую (кокс) фазы. Материал зоны IX служит жидкоподвижным гарнисажем стен горна, который в зависимости от состава и свойств может либо защищать кладку стен от механического и теплового воздействия, либо способствовать эрозии углеродистых блоков футеровки горна.

Перед фурмами, вследствие циркуляции кокса, формируется ярко выраженная полость, вокруг которой образуется зона II крупного округлого кокса, способствующая направленному поступлению к оси образующихся

в зоне горения восстановительных газов. Объем кокса под зоной плавления трансформируется в коксовую насадку, через которую не только фильтруется газ, но и активно просачивается металл. В межкусковых объемах насадки задерживается некоторое количество шлака [5].

В соответствии с результатами экспериментальных исследований [1,6] установлено, что за зоной II в направлении к оси печи скапливается мелкий (~5мм) округлый кокс, образующий характерную зону III мелкого кокса. Это является результатом абразивного воздействия на поверхность кусков кокса в области циркуляции, а также следствием неполного сгорания в фурменной области крупных кусков кокса и выталкивания мелочи за пределы очага горения. В зависимости от свойств исходного кокса объем зоны III, находясь в динамическом состоянии, уменьшается при улучшении и увеличивается при ухудшении качества кокса. Сжигание кокса зоны III регулируется, вероятно, зоной IV, называемой иногда «птичьим гнездом» и представляющей собой линзу, состоящую из смеси графита, металла и шлака, формирующейся из жидких оксидов золы кокса и очень мелкого кокса. Линзы образуются под каждой из фурм, через них происходит опускание в горн мелкого кокса в зону V. Они способствуют удержанию кокса в очагах горения. Размеры и форма зон I, II и III на рисунке показаны условно, они существенно зависят от дутьевого режима, качества кокса и других факторов.

В структуре коксовой насадки часто выявляется область (зона VI), где скапливается пропитанный каплями металла и шлака крупный исходный угловатый кокс, поступающий из малонагруженной рудной сыпью осевой зоны по поверхности зоны VII, получившей название «тотерман». Малоподвижный (или, как его иногда называют, малоактивный) конус нельзя рассматривать как мертвую зону, т.к. в ней протекают процессы восстановления, газомеханики, тепло- и массообмена. «Тотерман» включает зоны VII и X и отделяется от подвижных зон кокса (II, III, IV, V и VI) линией скольжения (А-А). Образование зоны VI может быть обусловлено свойствами рудной составляющей, способствующей образованию низкоосновного, плохо текучего шлака, затрудняющего объединение капель металла в струйки и поступление его в металлоприемник. Существование капель металла в массе кокса создает возможность при неудачном сочетании распределения материалов и дутьевого режима заметной металлизации «тотермана», способствующей уменьшению его газопроницаемости и жидкодинамических свойств. Это следует из анализа состава зоны VII, находящейся в составе массы «тотермана», содержащей капли металла и шлака.

Из рис.1 следует важная взаимообусловленная роль малоподвижного «тотермана» и динамических зон кокса (подвижной коксовой насадки) в формировании направленных потоков кокса в фурменную зону, а также газа и жидких фаз в нижней части доменной печи. Одним из кардинальных свойств «тотермана» является регулирование поступления кокса в

фурменную зону сверху по каналу (в составе коксовой насадки) и снизу через расплав, что обеспечивает регулирование газодинамического режима плавки по сечению печи.

На доменной печи №3 Кимицу (Япония) экспериментально установлены особенности состояния оксидных составляющих (SiO_2 и K_2O) кокса на уровне фурм, соотношенные с достигнутыми здесь температурами (рис.2), определенными по степени графитизации углерода в пробах, извлеченных из горна по оси фурм. Кокс, поступающий в фурменный очаг (температура 2000°C) из «тотермана», вследствие взаимодействия с жидкими продуктами плавки ниже горизонтальной оси фурменной зоны, где доминирует восстановительная среда, содержит небольшое количество кремнекислоты (1–2%) и 0,05–0,2% щелочных элементов.

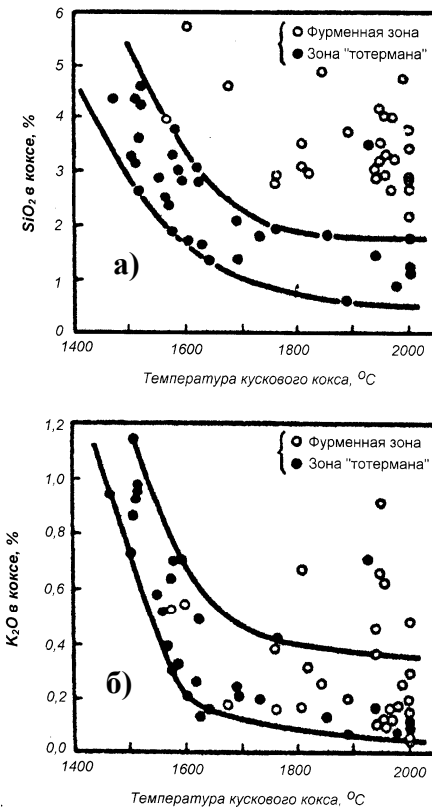


Рис.2. Взаимосвязь между температурой кокса и содержанием в нем SiO_2 (а) и K_2O (б) на уровне фурм.

Обусловлено это активным развитием процесса восстановления SiO_2 до летучего монооксида SiO , поглощаемого, в частности потоком оксидного расплава, протекающего через «тотерман», либо движущегося по поверхности скольжения (sliding furnace [7]). В то же время, кокс, поступающий в фурменный очаг сверху из коксовой насадки, содержит в области таких же высоких температур повышенное количество SiO_2 (3–6%). Это обусловлено более высокой скоростью процесса газификации углерода кокса в окислительных условиях фурменной зоны по сравнению со скоростью испарения SiO_2 из золы кокса. Содержание щелочных элементов в отобранных пробах в условиях высоких температур колеблется

в широком диапазоне (от 0,1 до 1,0%), обусловленном особенностями газификации кусков кокса, связанной с динамикой их поведения в очаге горения, а также характером поглощения щелочных паров в надфурменных областях коксовой насадкой. Кокс, опускающийся в жидкие продук-

ты плавки горна из «тотермана» по оси печи или вблизи ее (температура $\sim 1400^{\circ}\text{C}$) содержит 4–4,5% SiO_2 , это меньше, чем в исходном коксе ($\sim 6\%$), что определяется, вероятно, активным газовым потоком, содержащим около 1% щелочей, образующих с SiO_2 летучие соединения, а также воздействием оксидного расплава, формирование которого связано с пониженным уровнем рудных нагрузок в осевой зоне.

Результаты исследований, выполненных в последние годы, показали важность «тотермана» как проводника жидких фаз и газа, подтвердили требования к его чистоте [7, 8], увеличили интерес к определению его состояния и работы. Современная доменная печь характеризуется большим диаметром горна и интенсивным потоком расплавленных масс, что затрудняет движение потока газа и жидких продуктов плавки через «тотерман» и объем горна, а также поддержание достаточного уровня температур в осевой зоне. В этой связи наиболее важными являются исследования, связанные с пониманием процессов в коксовой насадке печи, «тотермане» и горне, с оценкой проницаемости этих элементов структуры столба шихты. Такие исследования проводились еще в первой половине XX в. [9] с помощью зондирования через глаз фурмы горна ломом, по нагреву которого после извлечения определялось распределение температур по радиусу горна. При скоплении большого количества мусора в горне, лом в середине оставался темным (не прогретым), а в некоторых случаях лом невозможно было продвинуть через среднюю часть горна, что свидетельствует о значительном понижении температуры и присутствии в этом месте нерасплавленных масс. Образование плотного плохопроницаемого слоя поверхности «тотермана» подтверждено результатами экспериментальных исследований на ДП–9 «Криворожстали» [10].

Условия плавки, ее интенсивность, особенности загрузки, режим циркуляции щелочей и др. весьма значительно влияют на разрушение кокса, обуславливают появление в коксовом слое мелких частиц, уменьшающих проницаемость «тотермана», увеличивающих поверхность контакта «жидкость–твердая фаза» и фрикционные силы. При этом к твердым частицам в «тотермане» могут быть отнесены:

- мелочь, внесенная при загрузке печи и полученная вследствие объемных или поверхностных разрушений силами, возникающими в кусковой и вязко–пластичной зонах, либо мелочь, образующаяся вследствие реакции газификации кокса;
- частицы оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO), либо рудные частицы, богатые этими оксидами, остающиеся твердыми при температурах «тотермана», либо частицы, откладывающиеся в коксовом слое из шлака, который содержит дисперсную твердую фазу, а также частицы, появляющиеся в результате восстановления легкоплавкой фазы на базе FeO и др.;
- несгоревшая в фурменной зоне углеродсодержащая мелочь кокса (или пылеугольного топлива), приносимые в «тотерман» газовым пото-

ком, а также отложения графита из мелких капель чугуна, выброшенные из циркуляционной зоны печи в область с пониженной температурой.

Наряду с присутствием в слое кокса твердых частиц, «тотерман» доменной печи представляет собой высокогетерогенную (неоднородную) реакционную среду капель металла и шлака, движущуюся сквозь коксовую насадку в соответствии с градиентом температуры и восстановительного потенциала. Если коксовая насадка «тотермана» имеет большую проницаемость, капли металла и шлака быстро продвигаются в горн под действием силы тяжести. При этом время перемещения определяется вязкостью капель шлака, а также величиной порозности коксовой насадки, которая по данным [2] должна быть не ниже 0,7 ед. При прохождении жидких фаз через коксовую насадку в зоне «тотерман» – горн развиваются реакции восстановления углеродом кокса ряда оксидов, а также происходит науглероживание металла.

Если коксовая насадка «тотермана» не загрязнена и дренаж жидких продуктов активен, то реакции восстановления элементов не достигают равновесия. И наоборот, когда коксовая насадка «тотермана» загрязняется, дренаж всех жидкостей замедляется и возможности приближения реакций газ–металл, кокс–металл, металл–шлак к равновесию возрастают. Снижению проницаемости «тотермана» способствует ухудшение качества кокса (увеличение диапазона крупности и уменьшение его среднего размера), снижение восстановимости руды, увеличение содержания мелочи в циркуляционной зоне, неадекватное процессу распределение шихты. Чистота «тотермана» обусловлена и рядом технологических факторов. Так, чистота «тотермана» ухудшается при увеличении скорости истечения дутья из фурм больше определенного уровня, приводящей к разрушению кокса, резко ухудшается при наличии двуоксида титана в руде и др. [11]. Существенное увеличение проницаемости «тотермана» необходимо при увеличении производительности доменной печи и интенсивности плавки, при соответствующей организации отработки продуктов плавки. Эффективность функционирования «тотермана» оценивается по нескольким показателям, из которых наиболее результативным является степень карбонизации металла углеродом. Выдаваемый из доменной печи металл почти всегда не полностью насыщен углеродом. Величина отклонения от насыщения является показателем состояния горна. При этом уменьшение насыщения металла углеродом до 0,2% наблюдается лишь при чистом «тотермане» [11].

Для поддержания высокой газо- и жидкопроницаемости «тотермана» дренирующий металл должен последовательно аккумулировать мелкий углеродсодержащий материал (частицы кокса, сажистый углерод и др.). При этом, когда металл быстро дренирует через чистый «тотерман», он практически не разрушает крупные куски кокса, а сам поступает в горн с высоким сродством к углероду, что обуславливает очистку горна от мелкого кокса и способствует обновлению горна прочным и крупным топли-

вом. Если металл, находящийся в состоянии капельного течения удерживается в «тотермане» за счет низкой его проницаемости, наблюдается разрушение кусков кокса, а металл поступает в горн с малым сродством к углероду, то исключается очистка горна от мелочи. Обновление коксовой насадки горна затрудняется вследствие поступления в металл кокса, подвергнувшегося разрушению в «тотермане». Одним из определяющих факторов эффективной работы элементов структуры столба шихтовых материалов в доменной печи является качество используемого кокса. Результаты исследований показывают [1, 12], что вследствие термохимических и силовых воздействий в доменной печи изменяется крупность кокса, его прочностные характеристики, меняется реакционная способность, что существенным образом влияет на развитие процессов доменной плавки. Так, при возрастании реакционной способности кокса уменьшается его прочность и крупность, увеличивается количество мелких фракций, концентрирующихся (рис.1) в определенных зонах горна и часто служащих причиной изменения направления газового потока на периферию, вследствие деформации структуры зоны циркуляции, сопровождающейся затруднениями капельного течения металла и шлака, что приводит к уменьшению проницаемости «тотермана» из-за скопления мелочи.

На состояние кокса в печи влияние оказывают: доля щелочей, циркулирующих в столбе шихты, температура и содержание углекислоты в газе, горячая прочность кокса (CSR [1, 12]), тесно связанная с его реакционной способностью (CRI). В частности, установлено, что снижение предельного уровня CSR до 55,5–57,5% приводит к увеличению реакционной способности кокса, снижению температуры и повышению скорости его газификации, сокращению объема зоны косвенного восстановления, уменьшению количества генерируемого тепла и степени его использования (уменьшение η_{CO}). При этом часто наблюдается аномальный сход шихты (обрывы, осадки, зависания), забивание чугунной летки коксом, затруднения в отработке продуктов плавки, снижение их качества.

Анализ строения, состояния и роли рассмотренных зон в структуре коксовой насадки выше и ниже уровня фурменных очагов показывает необходимость развития углубленного подхода к вопросам рационального распределения шихтовых материалов на колошнике и установлению требований к свойствам и качеству кокса (в первую очередь к его горячей прочности), а также к дутьевому режиму доменной плавки. Подчеркнем, что управление распределением шихтовых материалов должно включать не только рациональное распределение рудных нагрузок, но обеспечивать рациональное распределение по радиусу печи оксидной составляющей железорудного сырья. В частности, необходимо поддерживать достаточный уровень основности на периферии и в осевой зоне, что позволяет повысить защитные свойства жидкоподвижного гарнисажа (зона IX) и облегчить дренаж жидких фаз по образующим «тотермана» (зона VI), сохранять постоянной его чистоту, в частности, за счет подачи в ось круп-

ного прочного кокса, оптимизации размеров осевой отдушины, обеспечения согласованного схода шихты по центру и на периферии, исключаящего заметное перемещение рудных компонентов к оси и этим обеспечивающее эффективное функционирование «тотермана» как регулятора распределения газового и жидкостного потоков по сечению печи, управляемого поступления кокса в фурменные очаги из коксовой насадки и через жидкие фазы горна.

1. *Burgess John M.* Blast Furnace Raceways – a Review. International Blast Furnace Hearth (Raceways Symposium), Newcastle, Australia, 1981, – P.1–10.
2. *Influence of Post Reaction Strength of Coke on Blast Furnace Operation / Y. Ishikawa, M. Kase, Y. Abe and all // Proceedings of the 42nd Ironmaking Conference, 1983, – v. 42, – P. 357–371.*
3. *Роль структуры столба шихты в достижении высокой эффективности доменной плавки / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, И.Г. Муравьева// В сб. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – К: «Наукова думка», 2002. – №5.– С.27–38.*
4. *Исследование процессов, участвующих в формировании столба шихтовых материалов / Нисю и др. // Тэцу-го-хагане, – 1982, – v.68. – №15. – С.2330–2337.*
5. *Assessment of the Blast Furnace Lower Zone Permeability Based on Liquids Flow Distribution / Sheng J. Chew, Paul Julli, Peter R. Austin and all // Ironmaking Conference Proceeding. – 2001. – P.241–252.*
6. *Influence of Ore to Coke Ratio Distribution on Descending and Melting Behavior of Burden in the Blast Furnace / M.Ichida, K.Nishihara, K.Tamura and all // Tetsu-to-Hagane. – 1991. – V.77. – P.1617–1624.*
7. *Phenomena in Blast Furnace Operated at an Extremely Low Fuel Rate / S.Kajikawa, R.Yamamoto, R.Nakajima and all // Tr. ISS Jap. – 1983. – V.23. – P.738–745.*
8. *Усовершенствование управления доменным процессом в Порт-Кембле / Р.Джи Найтингейл, Р.Джи Диппенар, В.–К.Лу. // Мемориальный симпозиум ISS Belton. – 2000. – Sydney, Australia. – P.37–47.*
9. *Павлов М.А.* Металлургия чугуна, ч. II. Доменный процесс. – Металлургиздат, 1944.
10. *Экспериментальное исследование машин для отбора проб газа и шахты доменной печи объемом 5000 м³ / В.И.Большаков, М.Т.Бузоверя, В.А.Строменко, С.Т.Шулико //В сб. «Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема». Вып.7. –М.: Металлургия, 1980. –С.75–79.*
11. *Y. Iwanaga.* Coke Properties Sampled at Tuyere and Control of Deadman Zone / Ironmaking and Steelmaking. – 1991. – V.18. – №2, – P.102–106.
12. *Влияние качества кокса на доменную плавку / И.И. Дышлевиц, В.И. Большаков, Н.А. Гладков, И.Г. Муравьева // Сб. тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», Наукова думка, 2001, – №4, – С. 14–21.*

Статья рекомендована к печати к.т.н. Н.М.Можаренко