

**Н.М.Можаренко, А.А.Параносенков, Н.М.Загоровская.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ И НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ЧУГУНА НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Показано значение восстановления железорудной шихты и науглероживания чугуна для движения материалов в доменной печи. Установлено влияние восстановления железорудной шихты и науглероживания чугуна на сход материалов в доменной печи.

**Современное состояние вопроса.** Распределение природного газа по фурмам доменной печи в настоящее время преследует лишь одну задачу – рациональное использование его как топливной добавки. Однако ввиду влияния природного газа на распределение и свойства газового потока по окружности доменной печи существует возможность осуществления его распределения для задач управления работой печи по окружности. Одной из таких сложных и трудноосуществимых задач является обеспечение ровности схода шихтовых материалов по окружности доменной печи. При этом совместно решаются два важных вопроса совершенствования доменной плавки – повышение степени использования природного газа и обеспечение ровности хода доменных печей по окружности.

Среди причин, определяющих движение шихтовых материалов в печи, восстановление оксидов железа и науглероживание чугуна при совершенствовании доменной плавки повышает степень своего влияния. Их вклад значительно увеличивается, что связано с увеличением рудной нагрузки на кокс в шихте и увеличением содержания углерода в чугуне.

Принято считать, что снижение расхода природного газа в какой-либо части окружности доменной печи вызывает обработку материалов газами с меньшим содержанием водорода. Шихта, менее подготовленная до области прямого восстановления, вызывает в печи большее расходование углерода кокса за счет прямого восстановления оксидов железа. Сход материалов в этой части печи при этом ускоряется благодаря большему высвобождению объема шихты [1].

Данное утверждение целиком основано на химической стороне влияния восстановления оксидов железа на высвобождение объема шихты в доменной плавке. При этом не рассмотрено влияние последующего явления за восстановлением – науглероживания чугуна и влияние восстановления на условия движения шихтовых материалов – газопроницаемость области кусковых железорудных материалов, газопроницаемость и проницаемость для расплавов коксовой насадки доменной печи. Поэтому задачей исследования было поставлено изучение газодинамических и высо-

котемпературных особенностей восстановления железорудной части шихты и науглероживания чугуна на движение материалов в доменной печи.

### 1. Влияние косвенного восстановления железорудной шихты на движение материалов в доменной печи.

При восстановлении оксидов железа газом, одновременно с механическим и тепловым воздействием, кусковая железорудная шихта растрескивается и измельчается. Хотя физический объем материалов при уплотнении становится меньше, при этом одновременно снижается газопроницаемость слоя шихты, следствием которого является ухудшение условий противотока материалов и газов. Движение материалов при уменьшении газопроницаемости замедляется за счет повышения сопротивления газового потока, что подтверждается практикой ведения доменных печей.

Низкотемпературное (до  $800^{\circ}\text{C}$ ) разрушение железорудных материалов тесно связано с восстановлением оксидов железа газом. При этом общее содержание мелочи  $0,5\text{--}5\text{мм}$  и пыли  $0\text{--}0,5\text{мм}$  в слое агломерата и окатышей согласно данным работы [2] достигает соответственно  $36,3\text{--}38,9\%$  и  $16,8\%$ . Газопроницаемость слоя железорудных материалов в данной области определяется прочностью агломерата. Расчет по данным работы [3] показал, что с повышением степени восстановления на  $1\%$  содержание мелочи увеличивается в среднем также на  $1\%$ , рис.1.

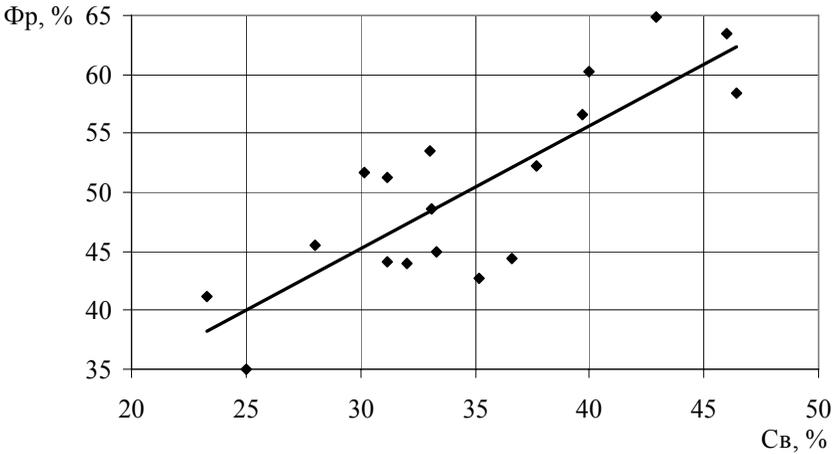


Рис.1. Зависимость количества фракции  $0\text{--}5\text{ мм}$  (Фр) агломерата от степени его восстановления (Св) по ГОСТ 19575–84

Теснота линейной связи степени восстановления агломерата и количества мелочи составила  $-0,83\text{ед}$ . Снижение газопроницаемости слоя шихты увеличивает перепад давления газа и способствует перераспределению газового потока в места сечения печи с большей проницаемостью для газа. Однако если в определенной части окружности доменной печи

увеличен расход природного газа, то большее количество водорода в газовом потоке обеспечивает ему кинетические преимущества при высокотемпературном восстановлении оксидов железа газом и движение через менее газопроницаемый слой материалов.

До температуры косвенного восстановления ( $1050^{\circ}\text{C}$ ) степень восстановления агломерата проявляла статистическую связь с усадкой слоя и перепадом давления, определяемый по ГОСТ 21707–76 [2] на уровне коэффициента корреляции соответственно 0,44 ед. и 0,28 ед. Из этого можно заключить, что повышение степени восстановления агломерата способствуют увеличению усадки и перепаду давления слоя шихты, однако это влияние не является определяющим. Тем более что в этой области усадка слоя и перепад давления, согласно работе [2] определяются развитием процесса размягчения и спекообразования. Увеличение усадки способствует высвобождению объем шихты, а при условии увеличения содержания водорода в газовом потоке степень влияния повышения степени восстановления шихты на перепад давления будет еще более снижаться и им можно пренебречь.

Влияние степени восстановления сказывается также на высокотемпературных свойствах железорудной шихты, определяющих в доменной печи очертания области вязко–пластичного состояния материалов. Математическая обработка данных работы [3] показала уменьшение температуры начала усадки и пятидесятипроцентной усадки агломерата (слой шихты при этом считается непроницаемым для газов) при повышении степени ее восстановления. Коэффициент корреляции был равен соответственно  $-0,41$  ед. и  $-0,43$  ед. Это можно объяснить образованием, размягчением и спеканием железорудной мелочи при развитии восстановления оксидов железа газом. Также с повышением степени восстановления агломерата увеличивается температура начала капельного течения железорудного расплава, особенно при основности более 1,35 ед., что было отмечено в работе [2]. Коэффициент корреляции для всего массива был равен 0,52 ед.

Была отмечена важная взаимосвязь разности температуры начала капельного течения и температуры пятидесятипроцентной усадки агломерата (приблизительно отвечающей температурному интервалу области вязко–пластичного состояния материалов) и степени его восстановления на уровне коэффициента корреляции 0,68 ед. (рис.2). Это позволяет сделать вывод об увеличении температуры капельного течения агломерата при увеличении содержания в нем мелочи, затрудняющей обособление капель расплава от поверхности шихты, что подтверждается значением тесноты линейной связи разности температур и содержания мелочи в агломерате при испытаниях по ГОСТу 19575–84 равной 0,66 ед.

Развитие процессов косвенного восстановления оксидов железа и движение газа в этих условиях возможно за счет увеличения в нем содержания водорода, обладающего малой плотностью и динамической вязко-

стью, а в области высоких температур повышенной химической активностью как восстановителя в сравнении с  $\text{CO}$ .

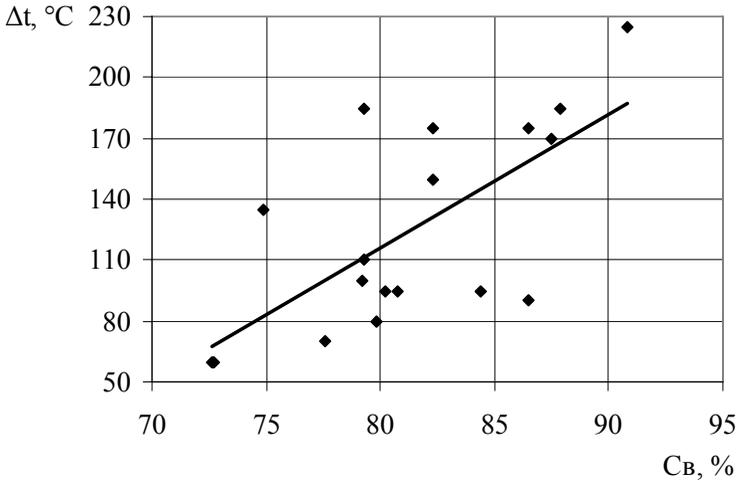


Рис.2. Зависимость разности температур начала капельного течения расплава и потери газопроницаемости слоя шихты ( $\Delta t$ ) от степени восстановления агломерата ( $C_{\text{в}}$ ) по ГОСТ 21707–76

Данный вывод хорошо согласуется с результатом работы [4], где было выявлено, что усадка слоя агломерата при его восстановлении газом с высоким содержанием водорода не влияет на ход процесса восстановления, в отличие от газа с преимущественным содержанием монооксида углерода. Кроме того, в вышеназванной работе также было определено, что увеличение содержания водорода в восстановительном газе в пределах 5–42% будет способствовать сокращению интервала плавления агломерата основности 1,25–1,55 ед. в среднем на 40–80<sup>0</sup>С. Предположительно, эта особенность вызвана тем, что перегрев оксидных материалов в атмосфере водорода повышает содержание анионных вакансий, которые определяют скорость диффузии аниона кислорода, лимитирующего процесс пластичной деформации железорудных материалов.

Следовательно, обнаруженная при исследованиях с восстановительным газом, состоящим преимущественно из монооксида углерода [3], способность увеличивать температурный интервал области вязкопластичного состояния материалов при повышении степени восстановления агломерата ослабевает с увеличением содержания в газе водорода. При дальнейшем увеличении содержания водорода в газовом потоке данный интервал сокращается, что обеспечивает увеличение газопроницаемости слоя материалов и улучшает условия противотока шихты и газов в печи. Следствием улучшения условий противотока шихты и газов является

ся ускорение движения шихтовых материалов печи. Эта закономерность выполняется как для всей печи, так и для какой-либо части ее окружности.

## **2. Влияние особенностей науглероживания чугуна на движение шихтовых материалов в доменной печи.**

Влияние науглероживания чугуна на движение шихтовых материалов в доменной печи зависит от распределения газового потока, что нашло свое отражение в регрессионных зависимостях определения содержания углерода в чугуне, где в колошниковом газе присутствовали монооксиды углерода и водорода, а также парциальное давление CO [5].

Ранее при разборке материалов «охлажденной» доменной печи [6] было выявлено увеличение содержания углерода в железоуглеродистом растворе в области развития косвенного восстановления оксидов железа. К тому же при проведении опытов в работе [7] была установлена прямая связь повышения параметров газодинамических условий доменной плавки (температуры дутья, содержания в нем кислорода и расхода природного газа) с увеличением содержания углерода в чугуне в зоне фильтрации расплавов и газов.

При исследованиях было установлено, что важным следствием увеличения степени восстановления агломерата является уменьшение температурного интервала области шлакообразования в доменной печи, определяемой нами как разность температуры максимальной фильтрации и начала капельного течения расплава, рис.3. Коэффициент корреляции был равен  $-0,76$  ед.

В совокупности с другими явлениями – увеличением доли суммарной металлической составляющей стекающего расплава (коэффициент корреляции  $0,33$  ед.) и общей доли профильтровавшегося расплава (коэффициент корреляции  $0,29$  ед.) с повышением степени восстановления агломерата – данная закономерность способствует ускорению движения шихтовых материалов в доменной печи.

Кроме обеспечения движения железорудной части шихты путем стекания в виде расплавов, обеспечивается также высвобождение объема шихты при растворении железистым расплавом углерода кокса.

Растворение углерода в железистом расплаве происходит с большой скоростью до его равновесного содержания. Расчет, проведенный по данным о высокотемпературных свойствах агломерата, показал, что объем кокса, израсходованного на науглероживание железистого расплава агломерата, в 2,8 раза больше объема кокса, затраченного на восстановление оксидов железа шлакового расплава. Для окатышей это соотношение составило  $0,4$  ед. Следовательно, в области фильтрации расплавов и газов с увеличением количества агломерата в шихте усиливается участие процессов науглероживания чугуна в расходовании углерода кокса.

Тугоплавкий остаток шихтовых материалов опускается с коксом в высокотемпературную область доменной печи, где в основном расплавляет-

ся и восстанавливается. При образовании тугоплавкого остатка железорудного материала уменьшается газопроницаемость слоя шихты, а при его плавлении и восстановлении снижается тепловой нагрев горна печи. Кроме того, не весь тугоплавкий остаток переходит в жидкое состояние. Часть его в осевой области печи сохраняется в виде твердого или полутвердого вещества, уменьшая рабочий объем доменной печи и препятствуя движению шихты.

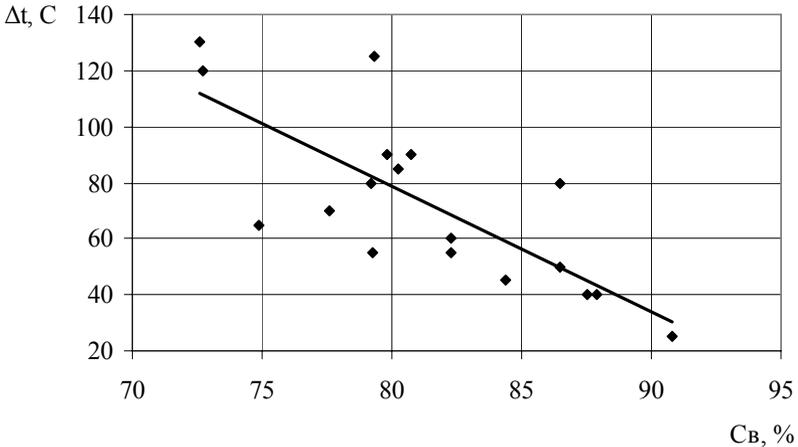


Рис.3. Зависимость разности температур максимальной фильтрации и начала капельного течения расплава ( $\Delta t$ ) от степени восстановления агломерата ( $C_{в}$ ) по ГОСТ 21707–76

Область тугоплавких материалов доменной печи №8, полезным объемом  $2000 \text{ м}^3$ , ОАО «Криворожсталь» (ныне – ОАО «Миттал Стал Кривой Рог») после частичной обрезки показана на рис.4. Тугоплавкий остаток доменной печи №8 представлял собой материал темно–серого и красно–бурого цвета, состоящий из разнородного твердого вещества тугоплавких шлаковых составляющих с вкраплениями извести, металлического железа и титанистых соединений. При попытке приподнять оставшуюся после обрезки часть, она раскололась надвое, обнажив разлом красно–бурого цвета с большим количеством металлического железа.

Из этого можно заключить, что область тугоплавких материалов многослойная и в доменной печи обладает способностью пропускания чугуна, что показывает несостоятельность использования по отношению к ней названия «тотерман». Поэтому следует различать высвобождение полезного (уровень засыпи – уровень фурм) и свободного (внутреннего ниже уровня засыпи) объема печи. Если высвобождение полезного объема непосредственно влияет на движение шихтовых материалов, то высвобож-

дение свободного объема ниже уровня фурм влияет на сход шихты в зависимости от газодинамических и шихтовых условий доменной плавки.



Рис.4. Вид области тугоплавких материалов горна доменной печи №8 ОАО «Криворожсталь» после частичной обрезки, 2005 г.

В свою очередь движение образующегося из железорудного материала шлакового расплава зависит от многих причин.

Одной из главных является содержание в нем оксида железа, восстановление которых может привести к вспениванию шлака и образованию железистого каркаса, препятствующего стеканию расплава [8]. В этой работе был определен уровень более 30% содержания оксида железа, при котором шлак становится совершенно не текучим. В работе [9] при 10% FeO в шлаке насадка почти его не пропускала. Расчет, проведенный по показателям химического состава агломерата НКГОК-2 за период 01.11.05–31.11.05 с применением зависимости определения количества оксида железа первичного шлака работы, показал наибольшую статистическую линейную связь содержания FeO первичного шлака с его содержанием в агломерате, рис.5.

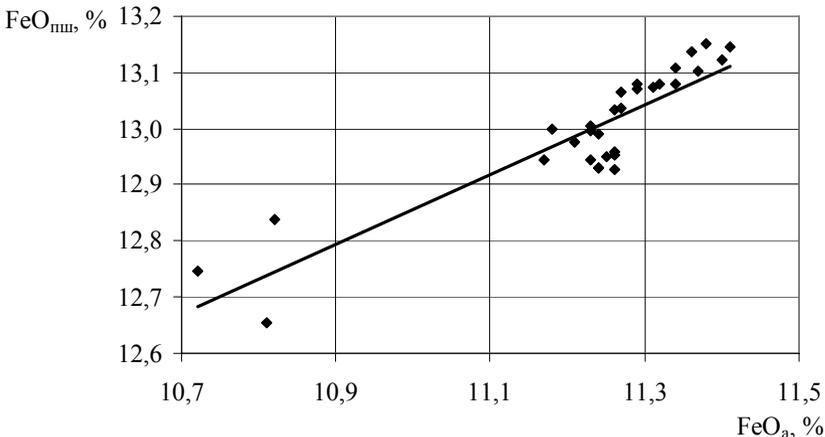


Рис.5. Зависимость содержания оксида железа в первичном шлаке ( $FeO_{пш}$ ) от его содержания в агломерате ( $FeO_a$ ) НКГОК-2 01.11.05–31.11.05

По этой зависимости видно, что с увеличением содержания FeO в агломерате на 1%, его содержание в первичном шлаке повышается на 0,62%. Так как содержание оксида железа в агломерате показывает его способность к восстановлению [10], то можно предположить, что повышенное содержание FeO в шлаке является следствием низкой степени восстановления шихты. Поэтому при повышении степени восстановления агломерата (в общем случае – железорудной шихты) снижается количество оксидов железа первичного шлака. При этом облегчается движение шлаковых расплавов через коксовую насадку, что в целом ускоряет сход материалов в доменной печи.

Следует отметить, что, как было установлено, увеличение содержания водорода в газовом потоке улучшает условия противотока шихты и газов в доменной печи, способствуя этим ускорению движения шихтовых материалов в доменной печи. Общее воздействие увеличения количества водорода в газе определяется влиянием газового потока на другие причины движения шихтовых материалов. Кроме того, на все рассмотренные явления, определяющие движение шихтовых материалов в доменной плавке, оказывает значительное влияние особенности теплообмена и температурные условия по всей высоте печи.

#### **Выводы.**

1. Одной из причин, определяющих движение материалов в доменной плавке, процессы восстановления железорудной шихты и науглероживание чугуна постоянно повышает степень своего влияния за счет увеличения рудной нагрузки на кокс и повышения содержания углерода в чугуне.

2. Установившееся предположение об ускорении схода шихтовых материалов при снижении расхода природного газа в части окружности доменной печи целиком основано на химической стороне условий высвобождения объема шихты и не учитывает влияние науглероживания чугуна, а также особенностей влияния восстановления на условия движения шихтовых материалов.

3. Повышение степени восстановления оксидов железа газом увеличивает содержание в агломерате мелочи, что способствует уменьшению скорости схода шихтовых материалов за счет повышения сопротивления газового потока. В то же время большее количество водорода в газовом потоке обеспечивает ему кинетические преимущества при высокотемпературном восстановлении оксидов железа газом и движении через менее газопроницаемый слой материалов.

4. Повышение степени восстановления агломерата газом способствуют увеличению усадки и перепада давления слоя шихты, однако это влияние не является определяющим. Увеличение усадки способствует высвобождению свободного объема шихты, а при условии увеличения содержания водорода в газовом потоке степень влияния повышения сте-

пени восстановления шихты на перепад давления будет еще более снижаться и им можно пренебречь.

5. Протяженность области вязко–пластичного состояния материалов в доменной печи с повышением степени восстановления оксидов железа газом увеличиваться за счет большего содержания в шихте мелочи, снижающей газопроницаемость слоя и затрудняющей обособление капель расплава от поверхности материала. Развитие процессов косвенного восстановления оксидов железа и движение газа в этих условиях возможно за счет увеличения в нем содержания водорода, обладающего малой плотностью и динамической вязкостью, а в области высоких температур повышенной химической активностью.

6. Важным следствием увеличения степени восстановления агломерата является уменьшение температурного интервала области шлакообразования в доменной печи, что в совокупности с другими явлениями – увеличением доли суммарной металлической составляющей стекающего расплава и общей доли профильтровавшегося расплава – способствует ускорению движения шихтовых материалов в доменной печи за счет усиления процессов науглероживания чугуна.

7. В области фильтрации расплавов и газов с увеличением количества агломерата в шихте усиливается участие процессов науглероживания чугуна в расходе углерода кокса.

8. Тугоплавкий остаток железорудных материалов представляет собой материал темно–серого и красно–бурого цвета, состоящий из различного твердого вещества тугоплавких шлаковых составляющих с вкраплениями извести, металлического железа и титанистых соединений. Область тугоплавких материалов многослойная и обладает способностью пропускания чугуна, что показывает несостоятельность использования по отношению к ней названия «тотерман».

9. При повышении степени восстановления агломерата (в общем случае – железорудной шихты) снижается количество оксидов железа первичного шлака. При этом облегчается движение шлаковых расплавов через коксовую насадку, что в целом ускоряет сход материалов в доменной печи.

10. Увеличение содержания водорода в газовом потоке улучшает условия противотока шихты и газов в доменной печи, способствуя этим ускорению движения шихтовых материалов в доменной печи. Общее воздействие увеличения количества водорода в газе определяется влиянием газового потока на другие причины движения шихтовых материалов.

11. На все рассмотренные явления, определяющие движение шихтовых материалов в доменной плавке, оказывает значительное влияние особенности теплообмена и температурные условия по всей высоте печи.

1. *Бугаев К.М.* Распределение газов в доменных печах. – М.: Металлургия, 1978. – 175 с.
2. *Поведение железорудных материалов в процессах доменной плавки / Гладков Н.А., Улахович В.А., Якушев В.С. и др.* // *Сталь* – 1989. – № 12. – С.7–12.
3. *Отчет о НИР ИЧМ под рук. Гринвальда А.А.* Установление рационального соотношения шлакообразующих и FeO в агломерате, обеспечивающего повышение степени использования газа в доменной плавке и улучшение качества чугуна. 1985. – 157 с.
4. *Исследование влияния состава и температуры восстановительного газа на интервал плавления агломерата / А.А.Гиммельфарб, А.О.Симонов, О.В.Кирюхин и др.* // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1995. – №2. – С. 12–14.
5. *Металлургия чугуна: Учебник / Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жеребин, А.Н.Похвиснев и др.* // – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.
6. *Фазовые превращения материалов при доменной плавке / И.Д. Балон, И.З. Буклан, В.Н. Муравьев, Ю.Ф. Никулин.* // – М.: Металлургия, 1984. – 152 с.
7. *О некоторых особенностях поведения углерода и микропримесей чугуна в условиях изменения параметров комбинированного дутья / А.С.Янковский, А.В.Польщиков, М.Д.Жембус и др.* // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1993. – №1. – С. 1–3.
8. *Гиммельфарб А.А.* Влияние изменения состава первичного шлака на температуру горна и ход доменной печи // *Известия вузов. ЧМ*. – 1960. – №6.–С.15–29.
9. *Шаврин С.В., Захаров И.Н., Ипатов Б.В.* Истечения шлака через насадку в противотоке газа // *Известия вузов. ЧМ*. – 1962. – №9. – С. 54–65.
10. *К вопросу об оптимизации основности агломерата и окатышей / А.С.Нестеров, И.Х.Балмагамбетов, Н.А.Гладков и др.* // *Сталь*. – 1989. – №11. – С. 5–8.

*Статья рекомендована к печати канд.техн.наук В.С.Якушевым*