

УДК 669.16

А.А. ТОМАШ, А.В. КУЗИН***ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ
ЗОНЫ РАЗМЯГЧЕНИЯ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ***

В работе расчётным путём оценено влияние пылеугольного топлива и компенсирующих мероприятий на изменение перепада давления газа в зоне размягчения.

Ключевые слова: горячая прочность кокса, зона размягчения, пылеугольное топливо

Введение

Черная металлургия является одной из ведущих отраслей промышленности Украины. Одной из основных и трудоемких стадий производства черных металлов является доменное производство.

Эффективность доменной технологии напрямую определяется удельным расходом кокса. В настоящее время за рубежом удельный расход кокса снижен до 250-300 кг/т чугуна, что в 1,5-2 раза ниже, чем в Украине. Это обеспечено не только за счет применения высококачественного железорудного сырья и кокса, высокого температурно-дутьевого потенциала горна, но и за счет вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в количестве до 200-250 кг/т чугуна [1-3].

Эффективность доменной технологии может быть существенно улучшена при условии рациональной организации противотока шихты и газа. С этой целью и для максимального снижения расхода кокса предлагаются различные компенсирующие мероприятия: применение более богатых по железу материалов, подготовка материалов по крупности, применение кокса с более высоким значением горячей прочности (CSR), применение новых видов загрузочных устройств и т.д. Указанные мероприятия направлены на улучшение газопроницаемости не только «сухой» зоны доменной печи, но и определяющей газодинамику печи зоны – зоны размягчения шихтовых материалов (зона когезии) [4, 5].

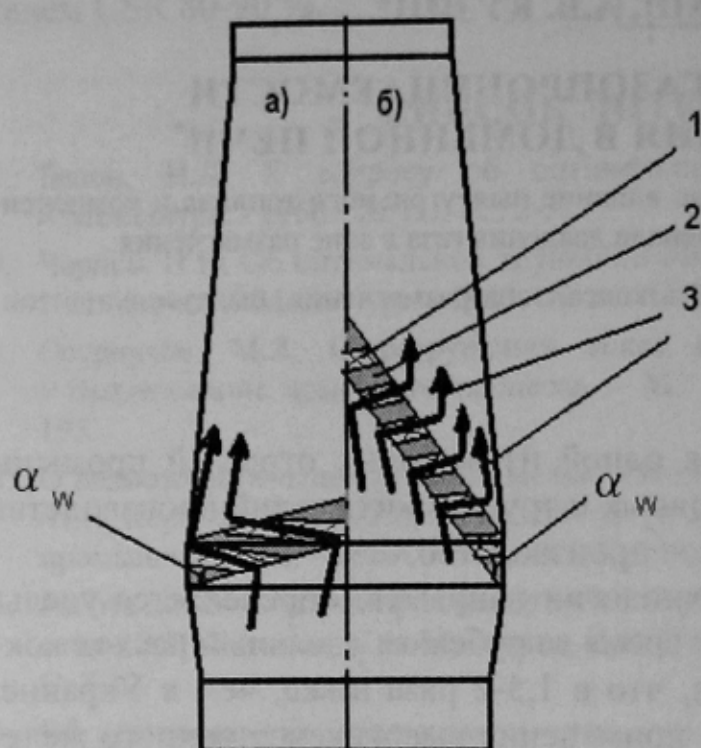
Однако до настоящего времени расчётным путём не оценено влияние компенсирующих мероприятий при вдувании ПУТ на изменение газопроницаемости зоны размягчения.

Цель работы

Целью представленной работы является оценка влияния компенсирующих мероприятий технологии доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива на изменение газопроницаемости шихты в зоне размягчения.

* Работа пополнена под руководством д-ра техн. наук, профессора С.Л. Ярошевского (ДонНТУ)

Основная часть



1 – слой кускового кокса (коксовое окно); 2 – слой размягчённой рудной шихты; 3 – потока газа; α_w – угол наклона коксового окна к границе зоны размягчения.

Рисунок 1 – Расположение зоны размягчения шихты в доменной печи:

а – при низкой интенсивности осевого газового потока;

б – при высокой интенсивности осевого газового потока;

принятый равным выходу газа на колошнике, $\text{м}^3/\text{с}$; PH – рудная нагрузка, отношение массы рудной шихты к массе кокса в подаче, т/т; γ_K и γ_A – насыпная плотность кокса и эквивалент насыпной плотности размягчённой шихты, $\text{кг}/\text{м}^3$; S_p – горизонтальная проекция площади основания зоны размягчения, м^2 .

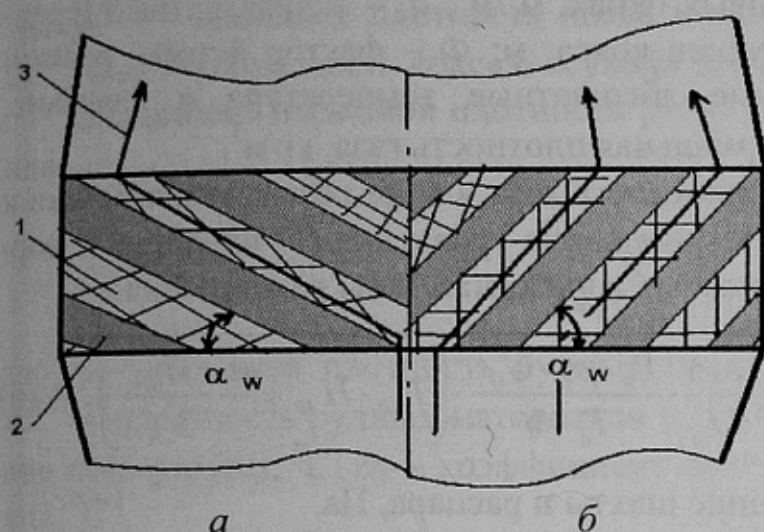
При расположении оснований зоны размягчения в распаре её площадь горизонтальной проекции равна площади распара. Для расчётов зона размягчения принимается горизонтальной (рис.2) с сохранением наклона коксовых окон к её границе.

Оценка изменения газопроницаемости зоны размягчения шихты в доменной печи при вдувании ПУТ осуществлялась с помощью математической модели, основанной на современных представлениях о строении этой зоны.

Зона размягчения имеет Λ -образную форму с основаниями, опирающимися на стены распара (рис. 1), и состоит из чередующихся коксовых окон и слоёв размягчённой шихты. Принято, что газ через зону размягчения может проходить только через коксовые окна. Слои размягчённой шихты приняты абсолютно непроницаемыми для газового потока [6]. В этом случае скорость доменного газа, приведенная к пустому сечению коксовых окон, составит

$$U_0 = \frac{Q_0 \cdot \left(1 + PH \cdot \frac{\gamma_K}{\gamma_A}\right)}{S_p} \quad (1)$$

где Q_0 – выход доменного газа при нормальных условиях,



1 – слой кускового кокса (коксовое окно); 2 – слой размягчённой рудной шихты; 3 – поток газа.

Рисунок 2 – Горизонтальная проекция зоны размягчения шихты на распар: а – при низкой интенсивности осевого газового потока; б – при высокой интенсивности осевого газового потока.

Высота зоны размягчения $H_{зр}$ принята равной высоте распара. Длина пути газа в зоне размягчения из-за наклонного расположения коксовых окон увеличивается и составляет

$$l = \frac{H_{зр}}{\sin \alpha_w} \quad (2)$$

где α_w – угол наклона коксового окна к границе зоны размягчения.

Сделано допущение, что температура газа меняется линейно с высотой зоны размягчения

$$T = T_{НР} + a_T \cdot H_{зр}, \quad (3)$$

где $T_{НР}$ – абсолютная температура начала размягчения, К; a_T – градиент температуры газа, К/м,

$$a_T = \frac{T_{КР} - T_{НР}}{H_{зр}} \quad (4)$$

где $T_{КР}$ – абсолютная температура конца размягчения, К;

Изменение температуры и давления газа оказывает влияние на его скорость и плотность в соответствии с законом состояния идеального газа.

С учётом сделанных допущений градиент давления газа P в зоне размягчения меняется в направлении от границы распара с шахтой к границе распара с заплечиками в соответствии с уравнением, следующим из формулы Эргана

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dH} = \frac{\Psi \cdot (1 - \varepsilon_K) \cdot (T_{НР} + a_T H) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot U_0^2 \cdot P_0}{2 \cdot \varepsilon_K^3 \cdot d_{\text{э}} \cdot \Phi \cdot T_0 \cdot P \cdot \sin \alpha_w}, \quad (5)$$

где Ψ – коэффициент сопротивления, определяемый по формуле

$$\Psi = 150/Re + 1,75;$$

ε_K – порозность кокса в коксовых окнах, м³/м³; d_{Σ} – эквивалентный (среднегармонический) диаметр кусков кокса, м; Φ – фактор формы, равный 0,7-0,8; T_0, P_0 – нормальные абсолютные температура и давление, $T_0 = 273$ К, $P_0 \approx 10^5$ Па; ρ_{Γ} – нормальная плотность газа, кг/м³.

В расчётах принято, что плотность газа в зоне размягчения близка к плотности горнового газа. Интегрирование уравнения (5) приводит к формуле для расчёта давления на разных горизонтах зоны размягчения

$$P = \sqrt{P_{\text{ш}}^2 + \frac{\Psi}{\sin \alpha_w} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_K)}{\varepsilon_K^3 \cdot d_{\Sigma}} \cdot \frac{P_0 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot U_0^2}{T_0 \cdot \Phi} \cdot \left(T_{\text{HP}} \cdot H_{\text{ЗР}} + \frac{a_{\Gamma} \cdot H_{\text{ЗР}}^2}{2} \right)}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ш}}$ – давление газа на границе шахты и распара, Па.

При подстановке в (6) значение высоты, изменяемое от 0 до $H_{\text{ЗР}}$, рассчитывали давление газа на границах зоны размягчения, соответственно $P_{\text{ш}}$ и $P_{\text{р}}$, а перепад давления ΔP рассчитываем как разность между $P_{\text{р}}$ и $P_{\text{ш}}$.

Значение рудной нагрузки в уравнении (1) удобно определять из соотношения

$$PH \approx \frac{[Fe]}{Fe_{\text{р}} \cdot K_{\text{уд}}}, \quad (7)$$

где $[Fe]$ и $Fe_{\text{р}}$ – содержание железа в чугуна и рудных материалах, %; $K_{\text{уд}}$ – удельный расход кокса, кг/т чугуна

Удельный расход кокса предварительно определяется по расчёту общего материального и теплового баланса доменной плавки или зональных тепловых балансов с делением доменной печи на две зоны. Возможна упрощённая оценка расхода кокса по уравнению

$$K_{\text{уд}} \approx K_0 \cdot [1 - 0,01 \cdot (Fe - Fe_0)] - 0,9 \cdot \text{ПУТ} - 0,8 \cdot \text{ПГ}, \quad (8)$$

где K_0 – удельный расход кокса при исходном содержании железа в шихте Fe_0 (%), отсутствии ПУТ и природного газа, но при сохранении высокой температуры дутья и других параметров доменной плавки, кг/т чугуна; ПУТ и ПГ – удельный расход ПУТ и природного газа, кг/т чугуна и м³/т чугуна; Fe – содержание железа в шихте в расчётный период, %.

Уравнение (8) может быть дополнено другими факторами (температура дутья, состав чугуна, расход металлодобавок и др.) с использованием известных коэффициентов приведения к равным условиям.

Насыпная плотность шихтовых материалов в зоне размягчения отличается от насыпной плотности шихты в «сухой» зоне доменной печи. Насыпная плотность кокса в коксовых окнах составит

$$\gamma_K = \gamma_K^{\text{сух}} \cdot \frac{1 - \varepsilon_K^{\text{ЗР}}}{1 - \varepsilon_K^{\text{сух}}}, \quad (9)$$

где $\gamma_K^{СУХ}$ – насыпная плотность кокса в «сухой» зоне, равная 480 кг/м^3 ;
 $\varepsilon_K^{СУХ}$ и $\varepsilon_K^{ЗР}$ – порозность кокса в «сухой» зоне и зоне размягчения, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Эквивалент насыпной плотности рудных материалов в зоне размягчения

$$\gamma_A = \gamma_P \cdot \frac{1 - \varepsilon_P^{СУХ}}{1 - \varepsilon_P^{СУХ}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha_V \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

где γ_P – насыпная плотность рудных материалов в «сухой» зоне, кг/м^3 ;
 $\varepsilon_P^{СУХ}$ – порозность рудных материалов в «сухой» зоне, кг/м^3 ; Δt – увеличение температуры, $^{\circ}\text{C}$; α_V – коэффициент объёмного термического расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Коэффициент объёмного термического расширения рудных материалов определялся экспериментально при нагревании смеси агломерата и окатышей крупностью 5–7 мм в шахтной лабораторной электропечи с 20 до 900°C по положению штока, помещённого на поверхность слоя нагреваемых образцов. Значение α_V составило $2 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Порозность и диаметр кусков кокса в коксовых окнах зоны размягчения приняты равными средним значениям между этими газодинамическими характеристиками в шахте и нижней зоне (горн и заплечики) доменной печи:

$$\varepsilon_K^{ЗР} = \frac{\varepsilon_K^{СУХ} + \varepsilon_K^{НИЖН}}{2}, \quad (11)$$

$$d_{\text{э}} = \frac{d_K^{СУХ} + d_K^{НИЖН}}{2}, \quad (12)$$

где $\varepsilon_K^{НИЖН}$ – порозность кокса в заплечиках и горне, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $d_K^{СУХ}$ и $d_K^{НИЖН}$ – эквивалентный (среднегармонический) диаметр кусков кокса в шахте и заплечиках доменной печи, м.

Порозность рудной шихты, смеси агломерата и окатышей, в «сухой» зоне определяли, исходя из их гранулометрического состава, по формуле

$$\varepsilon_P^{СУХ} = \varepsilon_{кр} - m \cdot \left[1 - \frac{1 - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр} \cdot \Phi_{2/3}^K} \cdot \frac{d_M}{d_K} \right] \cdot (1 - \varepsilon_M), \quad (13)$$

где m – объёмная доля мелкой фракции -5 мм, д.ед.; $\varepsilon_{кр}$ и ε_M – порозность крупной и мелкой фракции рудной шихты, $\varepsilon_{кр} = \varepsilon_M = 0,51 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\Phi_{2/3}^K$ – фактор формы крупных частиц, равный $2/3$ для шаров, для доменной шихты $\Phi_{2/3}^K = 0,5$; d_M/d_K – отношение диаметров мелких и крупных частиц, для рудных материалов составило $d_M/d_K = 0,125$.

Гранулометрический состав рудной шихты моделировался, исходя из сведений о содержании мелкой фракции в агломерате и окатышах. Доля мелочи составила $m = 0,061$ д.ед. (низкая доля мелочи является результа-

том отсева мелких фракций перед загрузкой в доменную печь). Порозность слоя рудной шихты в «сухой» зоне составила $0,487 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Насыпная плотность рудной шихты в шахте – $1935 \text{ кг}/\text{м}^3$. Эквивалент насыпной плотности размягчённой шихты в распаре – $\gamma_A = 2385 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Порозность кокса (однородного материала) рассчитывали по формуле [7]

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{кр} - g \cdot \left(1 - \frac{1 - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр} \cdot \Phi_{2/3}^K} \cdot \frac{d_M}{d_K} \right)}{1 - g \cdot \left(1 - \frac{1 - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр} \cdot \Phi_{2/3}^K} \cdot \frac{d_M}{d_K} \right)}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{кр}$ – порозность крупной фракции $0,55 \text{ м}^3/\text{м}^3$; g – содержание мелкой фракции (-25 мм в «сухой» зоне, -3 мм – в нижней части печи) в коксе, д.ед.; d_M/d_K – отношение диаметров мелких и крупных частиц кокса, для кокса составило $0,246$.

Порозность кокса в «сухой» зоне составила $0,543 \text{ м}^3/\text{м}^3$, эквивалентный диаметр кусков кокса в «сухой» зоне $41,6 \text{ мм}$.

Гранулометрический состав кокса в нижней части печи моделировали с помощью статистического распределения Вейбула по методике, изложенной в работе [8]. Для кокса с горячей прочностью $\text{CSR} = 41,23 \%$, соответствующей современному качеству кокса Алчевского металлургического комбината, уравнение Вейбула приняло вид

$$F(d) = 1 - \exp(-0,107 \cdot d^{0,92}) \quad , \quad (15)$$

а гранулометрический состав кокса в горне имеет следующий состав

$d, \text{ мм}$	0-1	1-3	3-5	5-7	7-10	10-25	25-40	40-60	+60
$g, \%$	10,11	15,27	12,02	9,78	11,60	28,46	8,57	3,19	1,0

Порозность кокса при $\text{CSR} = 41,23 \%$ в горне составила $0,424 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а эквивалентный диаметр частиц – $2,8 \text{ мм}$. Тогда газодинамические характеристики кокса в окнах зоны размягчения, рассчитанные по формулам (11) и (12) составят:

$$\begin{aligned} \varepsilon_K^{3P} &= (0,424 + 0,543)/2 = 0,484 \text{ м}^3/\text{м}^3, \\ d_{\text{Э}} &= (41,6 + 2,8)/2 = 22,2 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Насыпная плотность кокса в зоне размягчения при $\text{CSR} = 41,23 \%$ в соответствии с формулой (8) составила $542 \text{ кг}/\text{м}^3$. С увеличением горячей прочности кокса его порозность и эквивалентный диаметр возрастают, а насыпная плотность в коксовых окнах снижается.

Так как размягчённый материал частично проникает в коксовые окна и заполняет часть объёма межкусковых пустот, порозность кокса в окнах снижается:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_K^{3P} - V_P \quad , \quad (16)$$

где V_p – относительный объём проникшего в слой кокса размягчённого материала. Принято, что объём V_p составляет $0,08 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Расчёты выполняли для условий доменной печи №1 ОАО «АМК» полезным объёмом 3000 м^3 со следующими геометрическими характеристиками профиля: диаметр распара – $12,8 \text{ м}$, высота распара – 2 м . Расчёты проводили при следующих исходных данных: выход колошникового газа $119 \text{ м}^3/\text{с}$; плотность горнового газа – $1,16 \text{ кг}/\text{м}^3$; кинематическая вязкость газа $4,14 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ температура начала размягчения $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (1273 К); температурный интервал размягчения $200 \text{ }^\circ\text{C}$; угол наклона коксовых окон 15° ; избыточное давление газа на колошнике – 173 кПа , что соответствует условиям доменной печи; перепад давления в «сухой» части доменной печи 70 кПа . Тогда абсолютное давление на границе шахта – распар составит

$$P_{ш} = 100 + 173 + 70 = 343 \text{ кПа}.$$

Результатами расчёта являются значения перепада давления газа в зоне размягчения шихты. Их уменьшение свидетельствует о повышении газопроницаемости зоны размягчения и улучшении газодинамических условий доменной плавки.

Критическим значением перепада давления газа в этой зоне является 50 кПа . Превышение этого значения свидетельствует об опасности подвисаний шихты, необходимости снижения интенсивности доменной плавки, недопустимости такого режима и необходимости принятия мер по повышению газопроницаемости зоны размягчения.

Результаты расчёта представлены на рис. 3-8.

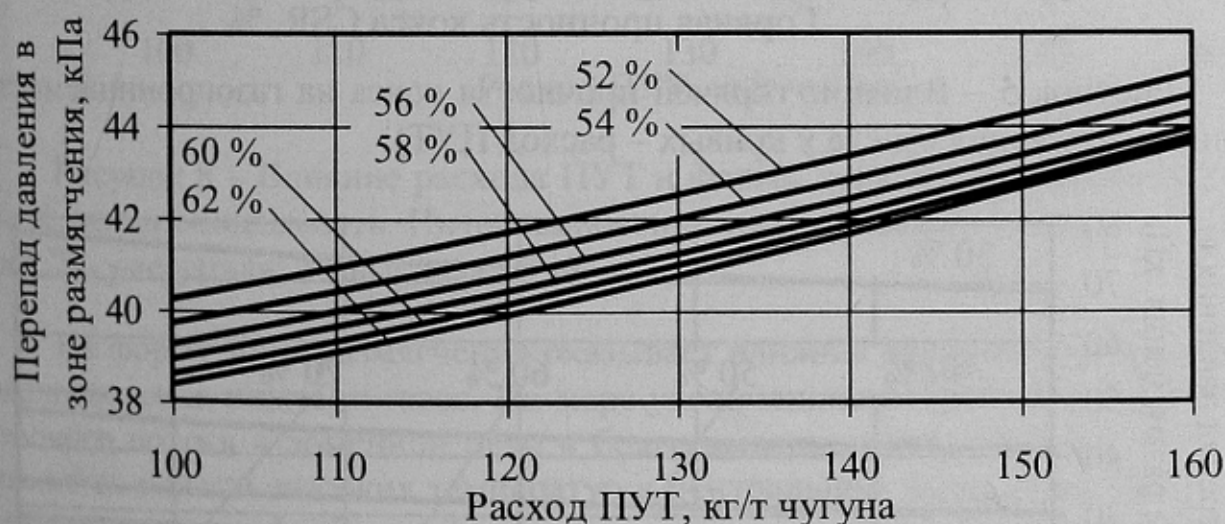


Рисунок 3 – Влияние расхода ПУТ и содержания железа в рудной шихте (числа у кривых) на газопроницаемость зоны размягчения шихты.

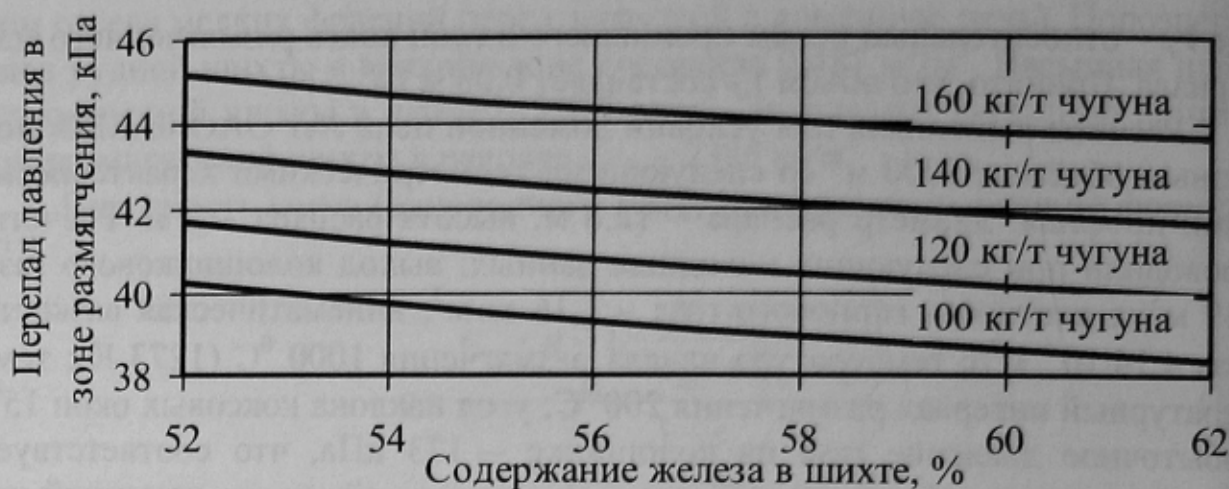


Рисунок 4 – Влияние содержания железа в рудной шихте и расхода ПУТ (числа у кривых) на газопроницаемость зоны размягчения шихты.



Рисунок 5 – Влияние горячей прочности кокса на газопроницаемость зоны размягчения (числа у кривых – расход ПУТ).

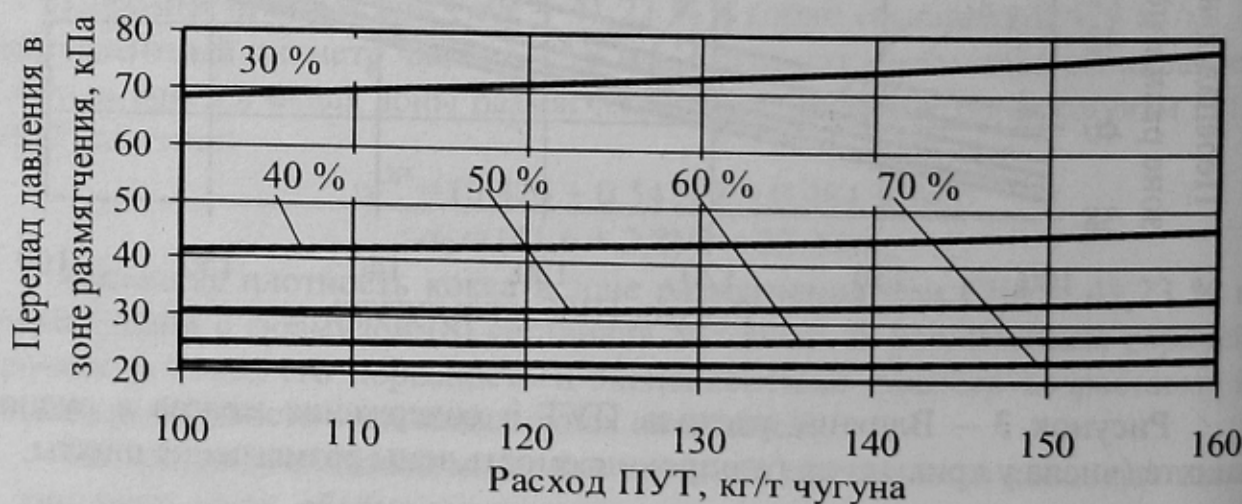


Рисунок 6 – Влияние расхода ПУТ и горячей прочности кокса (числа у кривых) на газопроницаемость зоны размягчения

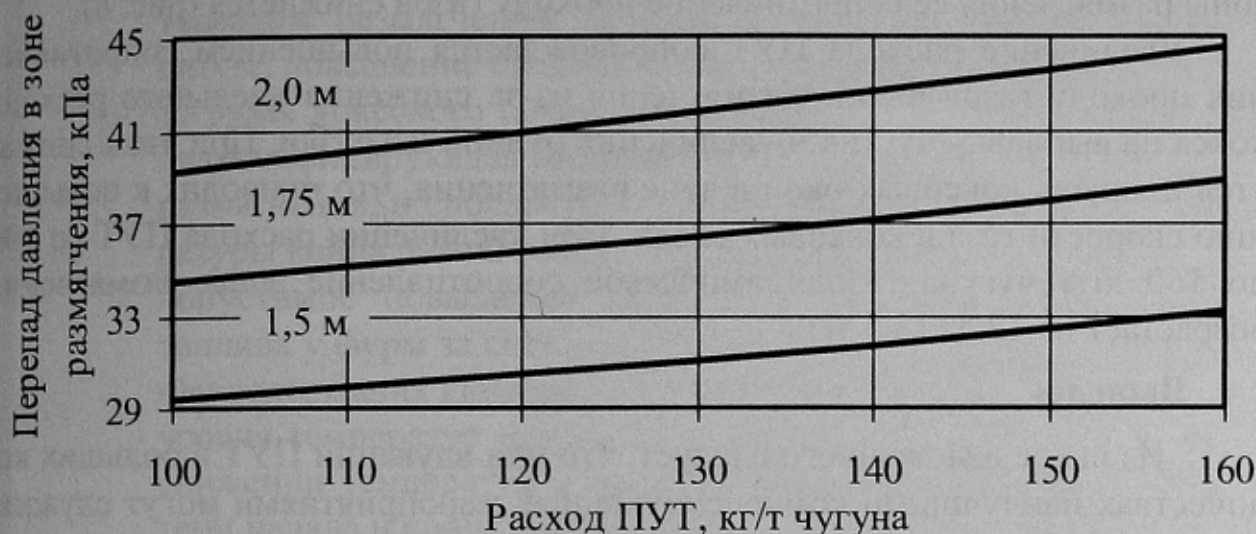


Рисунок 7 - Влияние расхода ПУТ и высоты зоны размягчения шихты (числа у кривых) на её газопроницаемость

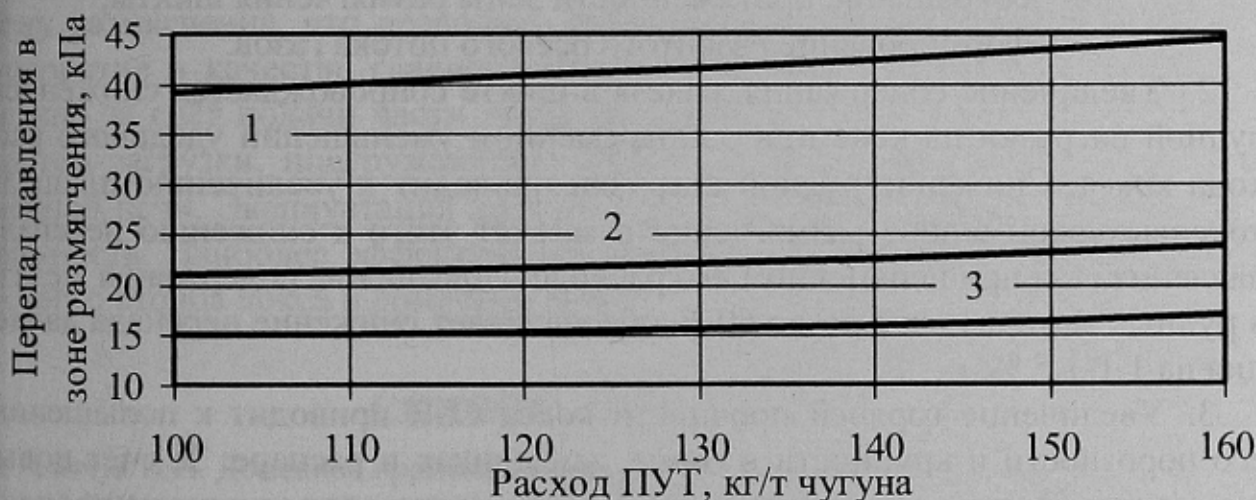


Рисунок 8 – Влияние расхода ПУТ и формы зоны размягчения шихты на её газопроницаемость. Интенсивность осевого газового потока: 1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая

На форму зоны размягчения оказывает влияние характер радиального распределения шихты и газов. По мере увеличения интенсивности осевого газового потока в доменной печи в более высокие горизонты шахты поднимается область высоких температур в центральной части печи. Соответственно вершина Δ -образной зоны размягчения также поднимается в более высокие горизонты. Это приводит к увеличению угла наклона коксовых окон α_w к границе зоны размягчения шихты (рис. 1 и 2). Угол $\alpha_w = 15^\circ$ соответствует низкой интенсивности осевого потока газа, значение угла $\alpha_w = 30^\circ$ – умеренному осевому газовому потоку, $\alpha_w = 45^\circ$ достигается при очень интенсивном потоке газов в центре. С увеличением интенсивности

газового потока и формированием более вытянутой в высоту Λ -образной зоны размягчения её сопротивление проходу газов снижается (рис. 8).

Увеличение расхода ПУТ сопровождается повышением сопротивления проходу газов в зоне размягчения из-за снижения удельного расхода кокса на выплавку чугуна и увеличения рудной нагрузки. При этом снижается площадь коксовых окон в зоне размягчения, что приводит к повышению скорости газа в коксовых слоях. При увеличении расхода ПУТ со 100 до 160 кг/т чугуна газодинамическое сопротивление зоны размягчения возрастает на $12,5 \div 13,5$ %.

Выводы

1. Из выше изложенного следует, что при вдувании ПУТ в больших количествах наилучшими компенсирующими мероприятиями могут служить следующие факторы:

- увеличение содержания железа в шихте;
- увеличение горячей прочности кокса CSR;
- сокращение протяжённости зоны размягчения шихты;
- формирование развитого осевого потока газов.

2. Увеличение содержания железа в шихте сопровождается снижением рудной нагрузки на кокс при одновременном уменьшении удельного расхода кокса. Снижение рудной нагрузки приводит к увеличению площади коксовых окон в зоне размягчения и за счёт этого к снижению перепада давления газа при неизменном его расходе. Повышение содержания железа в рудных материалах с 56 до 60 % обеспечивает снижение перепада давления на 1,1-1,5 %.

3. Увеличение горячей прочности кокса CSR приводит к повышению его порозности и крупности в горне, заплечиках и распаре. За счёт повышения газопроницаемости кокса в коксовых окнах сопротивление проходу газов резко снижается. Увеличение горячей прочности кокса с 41 до 50 % обеспечит снижение перепада давления газа в зоне размягчения на 20-25 %. Применение кокса с низкой горячей прочностью CSR=30 % недопустимо, так как перепад давления газа в зоне размягчения превышает критическое значение 50 кПа, что приведёт к неровному сходу и подвисаниям шихты и потребует снижения интенсивности доменной плавки независимо от расхода ПУТ. Критический минимальный показатель горячей прочности кокса, при котором $\Delta P_{зр} = 50$ кПа, составил: при расходе ПУТ 160 кг/т чугуна – 38 %; при расходе ПУТ 140 кг/т чугуна – 37,5 %; при расходе ПУТ 120 кг/т чугуна – 37 %; при расходе ПУТ 100 кг/т чугуна – 36 %.

4. Сокращение протяжённости зоны размягчения шихты уменьшает перепад давления газа в зоне размягчения пропорционально высоте зоны вязкопластического состояния шихтовых материалов. Уменьшение высоты зоны размягчения с 2,0 до 1,5 м снижает $\Delta P_{зр}$ на 25–26 %. Возможны несколько способов сокращения высоты зоны размягчения:

- подбор шихтовых материалов с меньшим температурным интервалом размягчения, переход к однокомпонентной рудной шихте, повышение степени офлюсования окатышей;
- загрузка коксового орешка совместно с рудными материалами, интенсифицирующая восстановление твёрдым углеродом в зоне размягчения, и способствующая за счёт этого снижению температуры конца размягчения;
- допустимое повышение теоретической температуры горения топлива у фурм за счёт увеличения температуры горячего дутья или содержания кислорода в дутье сопровождается повышением уровня температур ниже зоны размягчения при одновременном снижении температур в шахте и способствует сближению изотерм начала и конца размягчения.

5. Формирование развитого осевого потока газов позволяет снизить сопротивление проходу газов зоны вязкопластического состояния шихты в 2,6 раза за счёт уменьшения длины пути фильтрации газового потока через зону размягчения, что позволяет рассматривать это компенсирующее мероприятие в качестве главного. Достичь развитого осевого потока газов можно за счёт подачи части кокса непосредственно в центр колошника и систем загрузки, подгружающих рудной сыпью периферийную зону доменной печи. Эксплуатация лоткового БЗУ на ДП 1 АМК даёт такую возможность. Наиболее эффективным является формирование непрерывного осевого столба кокса в доменной печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савчук Н.А. Доменное производство на рубеже XXI века / Н.А. Савчук, И.Ф. Курунов // Новости черной металлургии за рубежом. – М.: ОАО Черметинформация, 2000. – Ч. II. – Прилож. 5. – 42 с.
2. Ярошевский, С.Л. Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины / С.Л. Ярошевский // Познание процессов доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – С. 366-387.
3. Ярошевский, С.Л. Перспективы и эффективность доменной технологии определяются степенью замены кокса пылеугольным топливом / С.Л. Ярошевский // Доклад на международной научно-технической конференции "Пылеугольное топливо – альтернатива природного газу при выплавке чугуна"; г. Донецк, 18-21 декабря 2006. – Донецк: Норд компьютер, – 2007. – 21 с.
4. Томаш, А.А. Изменение порозности многокомпонентной доменной шихты при размягчении / А.А. Томаш, В.П. Тарасов, В.Б. Семакова, А.В. Зотов // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 1999. – Вып. 8. – С. 9-14.
5. Тарасов, В.П. К вопросу рационального распределения материалов и газов по радиусу доменной печи / В.П. Тарасов, А.А. Томаш, В.Б. Семакова, О.Т. Хайретдинова // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2003. – Вып. 13. – С. 14-19.

6. Гуденау, Г.В. Оптимизация профиля пластической зоны доменной печи / Г.В. Гуденау, К. Крайбих, К.Х. Петерс // Чёрные металлы. – 1981 – № 3 – С. 13-18.
7. Томаш, А.А. Углубление теоретических положений расчета порозности зернистого материала / А.А. Томаш // Труды V-го международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий»; Днепропетровск-Кривой Рог, 7-12 июня, 1999 г. – Днепропетровск: Пороги, 1999 - С. 273-276.
8. Кузин, А.В. Оценка гранулометрического состава кокса и порозности в нижней части доменной печи / А.В. Кузин, С.Л. Ярошевский, Р.В. Ковальчик, А.А. Томаш // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – Алчевськ: ДонДТУ, 2008. – С. 125-133.

Поступила в редакцию 01.11.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. С.Л. Ярошевский

© **Томаш А.А., Кузин А.В., 2010**