

В.Г. Аносов⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

А.П. Фоменко⁽²⁾, главный специалист

Н.В. Крутас⁽²⁾, начальний цеха

Т.С. Цаплина⁽¹⁾, асистент

О ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

⁽¹⁾Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь»

Виконано аналітичне дослідження використання пиловугільного палива в горні доменних печей та його вплив на технологію плавки за матеріалами мирової практики. Планується впровадження у виробництво другого етапу використання пиловугільного палива на доменних печах ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь».

Выполнено аналитическое исследование использования пылеугольного топлива в горне доменных печей и его влияние на технологию плавки по материалам мировой практики. Планируется внедрение в производство второго этапа использования пылеугольного топлива на доменных печах ОАО «Металлургический комбинат Запорожсталь».

Введение. Патент на вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в фурмы доменных печей выдан Гескампу в 1926 г. Впервые эта идея использована на заводе им. Дзержинского в 1950 г., а в семидесятые годы прошлого столетия ПУТ начали применять на Карагандинском, Западно-Сибирском металлургических заводах, заводе «Запорожсталь», а также Донецком металлургическом заводе [1-3]. В дальнейшем на первых трех металлургических заводах отказались от использования ПУТ в связи с недостаточным качеством установок подготовки и подачи ПУТ к доменным печам, а также низкими ценами на природный газ и простотой оборудования по его использованию.

До настоящего времени в Украине ПУТ используют только на Донецком металлургическом заводе, а на ОАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь» завершается строительство новой установки по вдуванию ПУТ для четырех доменных печей.

В шестидесятые годы прошлого столетия положительные результаты по использованию ПУТ получены в США [4]. При проведении промышленных опытов по вдуванию гранулированного угля фракции +100 мкм выяснилось, что при больших расходах уголь сгорает не полностью. Предположили, что частицы при быстром нагреве до температуры дутья 1100 °С взрываются. Использование смеси гранулированного и пылевидного углей обеспечило лучшие результаты. Исходя из этого, компания «US Steel» решила применить систему ПУТ. На экспериментальной печи в Брюстоне (штат Пенсильвания) расход ПУТ был доведен до 230 кг/т чугуна. Особого успеха добилась компания «Armko», которая в 1972 г. ввела в строй усовершенствованную систему ПУТ и распространила ее на заводы Европы и Азии (Япония, Южная Корея).

В промышленном масштабе вдувание ПУТ в горн доменных печей практически всего мира получило распространение только в семидесятые годы [4,5] в связи с

дефицитом природного газа, а в настоящее время еще и с резким ростом цен на газ.

Использование ПУТ в доменных печах при сравнительно высоких капитальных затратах на системы его подготовки и подачи к печам, а также его распределения по фурмам, сравнительно быстро окупается за счет:

- меньших цен на угли;
- экономии капитальных затрат от вывода из строя устаревших коксовых печей и уменьшения выбросов в атмосферу при снижении объемов коксохимического производства;
- уменьшения доли низкокачественных углей для производства кокса, что позволит улучшить его качество;
- снижения текущих расходов при более высоком коэффициенте замены кокса углем по сравнению с природным газом.

Основная часть. В настоящее время примерно треть доменных печей всего мира использует пылеугольное топливо, при этом максимальные расходы ПУТ колеблются от 150 до 230 кг/т чугуна. При расходах ПУТ до 150 кг/т чугуна наблюдается максимальный коэффициент замены кокса – 0,9 кг/кг ПУТ; при расходах до 230 кг/кг ПУТ – его величина уменьшается до 0,8; а при расходах более 230 кг/т значение коэффициента замены кокса понижается до 0,7 кг/кг ПУТ.

Более высокие расходы ПУТ наблюдаются на печах, имеющих лучшее качество шихты и возможность управления ее распределением, в первую очередь, по радиусу колошника. При максимальных расходах экономия кокса достигает 150...180 кг/т чугуна (около 32% объема кокса). На эту же величину (от 4,3 до 20,5%* [6-8]) увеличивается рудная нагрузка и сопротивление движению газа λ , которое рассчитывают по формуле:

$$\lambda = \frac{\sqrt[1,7]{(P_D^2 - P_K^2)}}{V_{ф.г.}}, \quad (1),$$

где P_D, P_K – давление дутья и колошникового газа, кПа, соответственно; $V_{ф.г.}$ – объем фурменного газа, $\text{нм}^3/\text{мин}$.

Увеличение расхода ПУТ более 200 кг/т чугуна отмечено резким повышением (на 15%) содержания углерода в пыли и шламе.

Более высокие расходы ПУТ с сохранением ровного хода достигнуты на печах с более высокими показателями «горячей» прочности кокса (CSR), соответствующей по нашим ГОСТам холодной прочности M_{25} .

Благоприятным условиям для увеличения расхода ПУТ явилось распределение материалов с «центральной» ходом печи [9], которое осуществляли загрузкой более крупного кокса в центр колошника, а менее крупного – в периферийную и промежуточную зоны радиуса послонно с железорудной частью.

Установлено также, что после остановок печей, работающих с повышенным расходом ПУТ, возникает дефицит теплоты в горне. Этот недостаток рекомендуется устранять либо дополнительным увеличением расхода кокса, либо временным увеличением расхода ПУТ, что более эффективно. Кроме того, технологическими инструкциями рекомендуется прекращать подачу ПУТ после того, как расход дутья уменьша-

* Меньшие значения соответствуют печам, работающим на подготовленной шихте и теоретической температуре около 2000 °С за счет компенсации кислородом из расчета (0,8...1,0) нм^3 кислорода на 1 кг угля

ется ниже заранее установленного во время остановки. Последующая подача ПУТ возобновляется после того, как шихта начинает опускаться, что способствует обновлению кокса в заплечиках и мертвой зоне [10].

При вдувании ПУТ восстановление ровного хода достигается с большими трудностями, чем при вдувании природного газа. Это связано с его большими расходами и повышенными коэффициентами замены кокса, что сопровождается «похолоданием» печи при расстройках хода и прекращении подачи ПУТ.

Кроме того, доменная печь очень чувствительна к нарушению графика выпусков чугуна. При пониженной газопроницаемости из-за повышенной рудной нагрузки кокс находится в печи более продолжительное время и измельчается в большей степени до прихода в горн, дольше находится в зоне циркуляции перед фурмами, образуя «птичье гнездо» из более мелкого кокса и уплотняя столб кокса в центре печи, что затрудняет дренаж газа и продуктов плавки.

Увеличение расхода ПУТ от 130 до 190 кг/т чугуна в печах Японии [11] сопровождалось усилением периферийного потока газов и перегревом кладки. Было установлено, что этому способствовало смещение фокуса горения (максимума диоксида углерода) к торцу фурмы и уменьшению объема циркуляционной зоны. Причиной этого явилась замена горячего кокса холодным низкокалорийным углем, отчего теоретическая температура уменьшалась. Для ее сохранения дутье обогащали кислородом, что сопровождалось уменьшением расхода и кинетической энергии дутья. А если учесть, что сопротивление шихты возрастает при увеличении рудной нагрузки, то вполне очевидно, что и по этой причине размер зоны циркуляции уменьшается. Для ее восстановления скорость дутья следует увеличить до величины более 230 м/с. Это можно осуществить как увеличением высова фурмы, так и уменьшением их сечения.

Глубину зоны циркуляции, по данным компании «*Negro*» (Австралия), можно определить по формуле

$$L_{з.ц.} = -0,390 + 0,00505 V_{д} , \quad (2)$$

где $V_{д}$ – скорость дутья, м/с.

Отбор проб кокса из зоны «тотермана» (ниже уровня дутьевых фурм) позволил установить обратную зависимость количества мелкой фракции кокса (-3 мм) от холодной прочности D_{15}^{150} и среднего размера загружаемого кокса и прямую зависимость расхода ПУТ и нижнего перепада давления газов от содержания мелкой фракции кокса.

Рекомендуется степень измельчения кокса уменьшить частично за счет увеличения горячей прочности CSR, а частично за счет загрузки более крупного кокса (фракции +45 мм) в центральную зону колошника в виде «холостых» подач, а более мелкого кокса (фракции +40 мм) с железорудной частью – в промежуточную и периферийную зоны колошника. Это существенно улучшит газопроницаемость шихты при высоких расходах ПУТ.

В доменных печах Канады вдувание ПУТ начали с 1996 г. [12]. При использовании недостаточно качественного кокса фракции +20 мм, кроме рассмотренных выше трудностей, столкнулись с проблемой налипания ПУТ в коленах трубопроводов при транспортировке его воздухом. Причиной этого явилось повышенное содержание фракции -10 мкм. При уменьшении доли размера фракции -74 мкм с 80 до 65% указанное явление было устранено. Для увеличения расхода ПУТ размер кокса был увеличен до +20 мм, диаметр фурм был уменьшен, а для полного сжигания угля применили наконечник сопла фирмы «*Кавасаки*» (Япония), улучшающий дисперсию угля в

зоне циркуляции.

Как отмечалось, при высоких расходах ПУТ необходимо существенное улучшение качества шихты, ее классификации и распределения в доменной печи [13,14]. Кокс должен иметь максимальное значение показателя CSR > 65% и минимальное значение CRI < 28%.

Доменный кокс после отсева фракции -30 мм на рудном дворе должен проходить механическую обработку для стабилизации его прочности, после чего он должен иметь:

- диапазон гранулометрического состава: фракции +80 мм – менее 10%, фракции -25 мм – менее 3%, средний размер кусков – 55 мм;
- механическую прочность M40 – более 80%;
- содержание влаги – менее 4%.

На многих заводах используют коксовый «орешек» в количестве до 120 кг/т чугуна и загружают его послойно с рудной частью шихты.

Железородная часть должна иметь максимальное значение $Fe_{общ}/SiO_2$ и преимущественно состоять из окатышей (до 100%) с меньшей долей агломерата. С целью повышения горячей прочности и улучшения газопроницаемости шихты расширяется использование предварительно восстановленных окатышей и металлолома (до 20%). По данным фирмы «Коккерель Самбре» (Канада) соотношение толщин слоев руды и кокса в подаче при увеличении расхода ПУТ до максимальных значений изменяется от 0,47 до 0,73.

Особое внимание следует уделить составу и свойствам углей, а также технологии их подготовки к сжиганию в горне. На зарубежных доменных печах используют преимущественно антрацит, жирные, газовые и пламенные типы углей. Их сравнительная характеристика с другими видами доменного топлива приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика различных видов топлива

Топливо	Кокс	Мазут	Природный газ	Угли			
				Антрацит	Жирный	Газовый	Пламенный
Теплота сгорания топлива, МДж/кг	35,0	25,3	9,8	31,5	28,5	27,5	22,3
Коэффициент замены кокса, кг/кг(м ³)	-	1,20	0,92	0,95	0,88	0,83	0,80
Отношение C/H, кг/кг	170	8,00	3,10	32,30	20,30	17,00	16,00
Объем продуктов горения, м ³ /кг	1,68	2,87	4,20	1,90	2,01	2,05	1,97

Из табл. 1 следует, что коэффициенты замены кокса для ПУТ выше, чем для природного газа. Уголь отличается значительно большей теплотворной способностью и меньшим объемом горнового газа, что позволяет при прочих равных условиях использовать его больше, чем природного газа. Судя по соотношению C/H, в углях содержится водорода в несколько раз больше, чем в коксе, но его в несколько раз меньше, чем в мазуте и природном газе. Это снижает упругость газа, то есть при увеличении давления в печи он сжимается в меньшей степени, чем газ, содержащий больше водорода.

Из вышесказанного следует, что чем выше марка угля, то есть выше содержание углерода, тем больше выделяется теплоты и выше коэффициент замены кокса углем. По результатам внедрения ПУТ на доменных печах компании «Hoogovens Ijmuiden» (Голландия) авторы работы [15] вывели зависимость коэффициента замены

от свойств угля:

$$K_3 = 2,3C_y + 4,5H_{2y} + 0,97A_y - 1,19 \quad (3)$$

где C_y, H_{2y}, A_y – содержание углерода, водорода и золы в угле, кг/кг, соответственно.

Видно, что, кроме углерода, полезно присутствие водорода, содержащегося в летучих угля, который улучшает физические и химические свойства газа. С этой точки зрения следовало бы выделить положительное влияние оксида углерода и отрицательное влияние других компонентов летучих веществ кокса. Спорным является положительное влияние золы в углях. По материалам исследований [16], каждый процент летучих веществ в углях ухудшает коэффициент замены кокса на 0,0066, а процент золы – на 0,017 кг/кг.

Тем не менее проведенный расчет коэффициентов замены для донецких углей марок *АС, Т, Г* и смеси *АС* и *Г*, рекомендованных для использования в качестве ПУТ для доменных печей [17,18] и приведенных в табл. 2, показал, что величины сопоставимы с достигнутыми на зарубежных заводах.

Таблица 2 – Состав ПУТ из донецких углей и коэффициенты замены кокса (K_3) при вдувании их в доменную печь

Марка угля	Состав углей, %							Цена* ПУТ грн/т	K_3 , кг кокса кг ПУТ
	C^p	H^p	O^p	N^p	S^p	W^p	A^p		
<i>АС</i>	86,6	2,25	0,85	1,20	1,00	0,50	7,60	480	0,98
<i>Т</i>	81,0	3,80	1,00	1,30	1,30	0,50	11,10	450	0,95
<i>Г</i>	70,2	5,20	9,20	2,50	0,30	0,50	12,10	500	0,78
Смесь 50% <i>АС</i> +50% <i>Г</i>	78,5	3,80	5,10	1,35	0,65	0,50	9,92	490	0,88

Примечание: * цена ПУТ в 2005 г.

Нетрудно заметить, что коэффициент замены кокса тем выше, чем больше уголь содержит углерода, водорода и меньше кислорода, то есть это угли марок *А, АС* и *Т*. Однако исследования показали, что более полное сгорание наблюдается для углей, содержащих повышенное количество летучих веществ: летучие вещества выделяются уже в полости фурмы, образуются поры и углерод легче окисляется.

Угли же с низким содержанием летучих веществ легче размалываются, за счет чего производительность мельниц можно увеличить на 40% и получить более мелкие частицы, чтобы они успели сгореть в окислительной зоне. Для увеличения полноты сгорания практикуют подачу технического кислорода через трубку, коаксиально расположенную снаружи инжекционной, через которую подают ПУТ. Такая технология особо эффективна при высоких расходах ПУТ.

Для улучшения сжигания углей рекомендуется прогревать ПУТ до температуры 300 °С перед подачей в печь доменным газом. При этом диоксид углерода адсорбируется на поверхности углей, образуя углеродо-кислородные комплексы, легко отделяющиеся при нагреве в полости дутьевой фурмы [19].

Для уменьшения рудной нагрузки и увеличения газопроницаемости шихты в мировой практике применяют подачу измельченных флюсов и железорудных материалов вместе с ПУТ [18,19].

Заключение В условиях существенного повышения цен на природный газ с 2009 г. его замена в доменных печах на пылеугольное топливо в количестве до 200 кг на тонну чугуна позволит уменьшить расход кокса до 300...350 кг/т чугуна, повысить

производительность и снизить затраты на выплавку чугуна на 10...15% несмотря на увеличение капитальных затрат на строительство углеподготовительного отделения

Требования к качеству шихты и дутья:

– железорудная часть должна состоять из стабилизированных и отсеянных от мелкой фракции (фракции -5,0 мм) офлюсованных и частично восстановленных окатышей и агломерата с максимальным отношением Fe/SiO_2 ; чтобы на каждые 100 кг ПУТ на тонну чугуна выход шлака уменьшался на 32 кг, рекомендуется использовать метал-лодобавки до 200 кг/т чугуна;

– кокс должен иметь максимальные значения горячей прочности – CSR (более 62%), минимальные значения реакционной способности – CRI (менее 28%) и фракционный состав +(40...80) мм;

– угли должны содержать до 37% летучих и 12% золы и вдуваться в печь в соотношениях: до 60% легковоспламеняющиеся (марки Γ), остальное – высококалорийные (марок A , AC и T);

– угольная зола должна иметь температуру плавления более 1400 °С;

– соотношение толщин слоев руды и кокса не должно превышать 0,73;

– дутье следует обогащать кислородом до величин 23...33% из расчета 0,5...0,8 м³ кислорода/кг угля для поддержания теоретической температуры в пределах 2000...2300 °С.

Требования к технологии доменной плавки:

– для улучшения газопроницаемости столба шихты и коксового «тотермана» рекомендуется работать с разрыхленным центром печи, то есть холостые подачи кокса фракции +45 мм загружают в центр, а рабочие подачи, состоящие из кокса фракции +40 мм, «коксowego орешка» и железорудных материалов, – в периферийную и промежуточную зоны колошника;

– для достижения максимальной степени окисления углерода у фурм следует подавать кислород в факел горения ПУТ, а уголь нагревать доменным газом с добавками стимуляторов горения;

– работать необходимо на максимально допустимом давлении газа в печи;

– для сохранения объема зоны циркуляции при обогащении дутья кислородом следует увеличить скорость дутья уменьшением диаметра фурм и увеличением их высоты в печь;

– разработать технологические режимы для компенсации теплоты в горне печи при кратковременных остановках и последующих задувках доменных печей;

– оборудовать доменные печи необходимыми системами контроля и управления расходом и распределением угольной пыли по фурмам и технологическими параметрами доменной плавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Освоение технологии плавки с вдуванием пылевидного топлива совместно с применением природного газа и обогащенного кислородом дутья на доменных печах завода «Запорожсталь» / З. И. Некрасов, Л. Д. Юпко, В. Л. Покрышкин [и др.] // *Металлургия чугуна*. – М.: *Металлургия*, 1972. – Вып. 1. – С. 98-111.
2. Дунаев Н. Е. Технология доменного процесса с вдуванием измельченного твердого топлива в горн доменной печи / Н. Е. Дунаев, А. К. Гусаров // *Металлургия чугуна*. – М.: *Металлургия*, 1972. – Вып. 1. – С. 111-119.
3. Дунаев Н. Е. Доменная плавка с вдуванием угля на доменной печи объемом 4200 м³ Западно-Сибирского металлургического завода / Н. Е. Дунаев, А. К. Гусаров // *Металлургия*

- чугуна. – М.: Metallurgy, 1972. – Вып. 1. – С. 119-127.
4. Coal injection into Blast furnace at Armko plant cut down coke expenditure to 28% // *Mines Mag.* – 1968. – Т. 58. – № 10. – P. 38-39.
 5. Coal injection into blast furnace // *Industr. Heat.* – 1968. – Т. 35. – № 6. – P. 1098-1100.
 6. *Lungen H. B., Steffen R.* // *MPT International.* – 1993. – № 4. – P. 160-161.
 7. Modern trends in blast furnace design at Nuova Italsider / *D. Illuminati, Vecchiola, G. Angelini* // *European Ironmaking Congress.* (14-17.09.1986, Aachen). – 1986. – V. 1. – P. 1-32.
 8. Operation with high coal injection and low coke rates in Europe / *G. Flierman, K. Langner, D. C. Leonard* [et. al.] // *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress.* (Gent. Belgium. 16-18.09.1996). – P. 64-71.
 9. Значение распределения радиального потока газов для распределения расхода ПУТ (Тиссен Шталь А.Г. Дуйсбург) / *В. Ковальски, Э. Беннер, К. Крабих* [и др.] // 4-й Европейский конгресс коксохимиков и доменщиков. – Париж, 2000. – С. 13-17.
 10. Current status of coal injection in North America / *M. A. Renate, D. G. White, J. Duncan* [et al.] // *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress* (Gent. Belgium. 16-18.09.1996.). – P. 64-71.
 11. Long term operation with 200 kg / thm of pulverized coal injection rate at Kakogava works // *K. Kadoguchi, T. Goto, R. Ito, T. Yabata* // *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress.* (Gent. Belgium. 16-18.09.1996). – P. 72-81.
 12. *Hide D. B.* Launching of installation for injection of coal in blast furnaces Stelco company // *D. B. Hide, U. R. Brown, S. I. Hutchison.* – 1998. – 15 s.
 13. High oil injection rates and high furnace productivity at HKM / *R. Altland, M. Besouglu, W. Lazner, K.P. Stricker* // *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress* (Gent. Belgium. 16-18.09.1996). – P. 93-98.
 14. Coke Quality requirements of European blast furnace engineers (joint EBFC – paper) / *P. C. Leonard, L. Boute, A. Tufour* [et al.] // *Proceedings 3rd European Ironmaking Congress* (Gent. Belgium. 16-18.09.1996). – P. 1-10.
 15. *Brouwer R. C.* Intensive injection of coal dust in Hoogovens furnaces / *R. C. Brouwer, H. L. Toxopeus* // *ATS. Conference on Steel Production.* – Paris. 1990. – P. 28.
 16. Blast furnace operating practice with natural gas injection at Warren Consolidated Industries / *Anil P. Lingras, GRI* // *Topical report. CRA,* 1992. – P. 107.
 17. Державний баланс запасів корисних копалин України. Вугілля // *Геоінформ України.* – 2004. – Вип. 22. – С. 5-9.
 18. Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк: УНИТЕХ, 2006. – 398 с.
 19. Повышение эффективности работы доменной печи при вдувании ПУТ с применением стимуляторов горения / *I. Sengupta, A. Kumar, S. Grosh* [et al.] // *AJSE Steel Tecknology.* 2000. № 2, с. 61-62 (Новости ЧМ за рубежом. – 1999. – № 12. – С. 20-28).

Стаття надійшла до редакції 02.03.2009 р.
Рецензент – проф. М.Ф. Колесник