



Кочура В.В. /к.т.н./, Ярошевский С.Л. /д.т.н./, Купенко В.И. /к.г.-м.н./, Мишин И.В.  
ДонНТУ

## Совершенствование методики определения степени газификации пылеугольного топлива в доменных печах

*Предложена усовершенствованная методика косвенного способа определения полноты сгорания пылеугольного топлива на основе петрографического анализа проб шлама, шлака и колошниковой пыли. Выбраны наиболее эффективные диагностические признаки, позволяющие наиболее точно и объективно оценить происхождение углеродистой частицы. На ДП № 1 ПрАО «Донецксталь»-МЗ в 2010 г., используя данную методику, проведен промышленный эксперимент, по результатам которого величина газификации угля составила более 99 %. Табл. 3. Библиогр.: 9 назв.*

**Ключевые слова:** горение, пылеугольное топливо, кокс, шлак, шлам, колошниковая пыль, петрографический анализ

*An improved method of indirect method of determining the completeness of combustion of pulverized coal on the basis of the petrographic analysis of samples of sludge, slag and flue dust. Selected the most effective diagnostic features that allow the most accurate and objective assessment of the origin of the carbon particles. On the DP number 1 PrJSC "Donetskstal"-MH "in 2010, using this technique, carried out an industrial experiment, the results of which the quantity of coal gasification was more than 99%.*

**Keywords:** burning pulverized coal, coke, slag, sludge, flue dust, petrographic analysis.

### Постановка проблемы исследования

Зарубежные и отечественные промышленные плавки на доменных печах (ДП) с высоким расходом пылеугольного топлива (ПУТ) 200-250 кг/т чугуна показали ограничение увеличения дальнейшего уровня вдувания угля в связи с неполнотой газификацией частиц угольной пыли. Поэтому постоянный контроль и количественная оценка степени сгорания ПУТ является важной задачей.

### Анализ последних исследований и публикаций

Для определения полноты сгорания частиц ПУТ в фурменном очаге доменной печи применяют различные прямые и косвенные методы и устройства. Примером косвенного метода может служить способ скоростной киносъемки фурменной зоны [1, 2]. В США с помощью киносъемки установлено, что частицы угольной пыли полностью сгорают на расстоянии 300-400 мм от носка фурмы [2]. Результаты, подтверждающие опыт американских ученых, получены в Китае при вдувании в горн 250-270 кг ПУТ на 1 т чугуна [3]. Одним из наиболее точных и достоверных прямых методов определения полноты сгорания частиц ПУТ является способ отбора проб путем зондирования горна. Институтом IRSID (Франция) совместно с фирмой «Solmer» разработано и внедрено в промышленную эксплуатацию устройство для отбора проб в горне доменной печи (труба с внутренним диаметром 90 мм) [4]. Введение в фурменную зону прямого зонда нарушает процессы, проходящие в зоне циркуляции, что искажает достоверность получаемых результатов. Решением данной проблемы является установка зонда под углом к оси фурмы. Данный способ реализован на

ДП № 5 завода Chiba Works фирмы «Kawasaki Steel Corporation» (Япония) [5].

В условиях ПрАО «Донецксталь»-МЗ («ДМЗ») проф. С.Л. Ярошевским разработан и испытан количественный метод определения полноты сгорания пылеугольного топлива в фурменных зонах [6]. Во время проведения исследований расход ПУТ изменялся в пределах 50-150 кг/т чугуна. В ходе проведения микроструктурного анализа проб материалов, отобранных из различных точек горна, было показано уменьшение размера частиц угля уже на срезе фурм, а полное сгорание ПУТ происходило на расстоянии 0,6-0,8 м от фурмы, что в два раза превосходит данные, полученные при скоростной киносъемке.

Методика исследования полноты сгорания ПУТ основана на определении с использованием петрографического анализа различных видов частиц углерода кокса, ПУТ и количественной оценке в отобранных пробах колошниковой пыли, шлама и шлака [7]. Исследования полноты сгорания ПУТ на доменных печах комбината Баостил, (Китай) показали, что неполнота сгорания ПУТ 1,1 и 2,6 % при вдувании в горн 178 и 240 кг/т чугуна ПУТ: при этом степень замены кокса ПУТ составляла около 40 %, расход кокса на 1 т чугуна был менее 300 кг/т чугуна, увеличение неполноты сгорания до 2,6 % при вдувании ПУТ 240 кг/т чугуна еще не препятствовало устойчивой и производительной работе ДП [7]. Однако в указанной работе использована только качественная оценка видов угля без учета всех видов диагностических признаков происхождения угля, учета изменения структуры частиц несгоревшего угля при прохождении через высокотемпературные области ДП, последнее вносит

значительную погрешность [8].

Таким образом, несмотря на значительный объем проведенных исследований, в настоящее время не разработана методика точного количественного определения полноты газификации ПУТ, позволяющая наиболее полно отразить процессы горения угля, происходящие в фурменной зоне и увеличить расход ПУТ.

**Цель и задачи исследования**

Целью статьи является разработка методики определения полноты сгорания ПУТ в ДП по содержанию углерода в продуктах плавки с использованием диагностических свойств частиц угля и кокса.

**Основная часть**

В работе представлены результаты второго этапа промышленного эксперимента по определению полноты газификации ПУТ, проведенные в 2010 г (первый этап – 2003-2005 гг. [9]). Промышленная эксплуатация пылеугольного комплекса в ПрАО «ДМЗ» начата в сентябре 2002 г. Доменный цех имеет в своем составе две доменные печи полезным объемом 1033 м<sup>3</sup>. На втором этапе исследований для определения полноты сгорания ПУТ на ДП-1 доменного цеха ПрАО «ДМЗ» использовался петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в продуктах доменной плавки: колошниковой пыли, шламе и шлаке.

ДП в указанный период работала эффективно на 100 % окатышах СевГОКа (1557 кг/т чугуна), производительность печи составляла 2000 т/сут., расход кокса «Премиум» – 422 кг/т чугуна, ПУТ – 135 кг/т чугуна, железоблюса – 64 кг/т чугуна, известняка – 147 кг/т чугуна. Пылеугольное топливо приготавливалось из 60 % газового и 40 % тощего углей. Показатели каче-

ства ПУТ характеризовались высокой тониной помола, стабильным техническим анализом (A = 10,35 %; S = 0,99 %; W = 1,58 %, ЛВ = 30 %). Средний медианный размер частиц ПУТ составлял 35 мкм (> 80 мкм 13,77 %; 80-63 мкм 8,9 %; 63-0 мкм 77,83 %).

Для проведения петрографических исследований изготавливались брикеты из шлама газоочистки и колошниковой пыли, ПУТ и кокса. Исследованы также аншлифы, изготовленные из образцов шлака, отобранных в тот же период. Химический анализ продуктов плавки ДП-1 приведен в табл. 1. Петрографический анализ выполнялся с применением методов рудной микроскопии и углепетрографии. Использовался рудный поляризационный микроскоп МИН-9 с микрофотометрическим устройством ФМЭ-1. Рудные, шлакообразующие и углеродсодержащие компоненты определялись по ряду оптических признаков (отражательная способность, цвет, двуотражение, эффекты поляризации, внутренние рефлексии), а также по микротвердости. Отражательная способность ( $R_o$ ), визуально воспринимаемая как яркость компонента в полированном брикете, численно равна отношению интенсивности отраженного света ( $I_o$ ) к интенсивности падающего света ( $I_n$ ).

Явление двуотражения характерно для анизотропных кристаллов. При изменении ориентировки плоскости поляризации света относительно кристаллографических направлений меняется отражательная способность (особенно ярко это свойство проявлено у графита). При введении дополнительного поляроида (анализатора) между объективом и окуляром заметна и очень слабая анизотропия (эффекты поляризации). При этом наблюдался цвет просвечивающих компонентов, обычно серых в отраженном свете (внутрен-

**Таблица 1. Химический анализ проб шлака, шлама, колошниковой пыли и ПУТ, взятых в мае 2010 г. на ДП № 2 ПрАО «ДМЗ»**

Наименование		№ 1 (16.05.2010)	№ 2 (19.05.2010)	№ 3 (30.05.2010)
Чугун	[Si]	0,51	0,62	0,65
	[S]	0,03	0,04	0,03
Шлак	(SiO <sub>2</sub> )	38,8	36,9	39,1
	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,8	5,7	5,8
	(CaO)	45,1	45,2	43,8
	(MgO)	6,7	6,8	7,2
Наименование	Шлам № 1	Колошниковая пыль № 1	Шлам № 2	Колошниковая пыль № 2
	(1.05.10–10.05.10)		16.05.10–31.05.10	
SiO <sub>2</sub>	7,2	5,1	8,6	11,3
CaO	6,2	3,4	4,5	6,6
MgO	0,8	0,4	0,6	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,2	0,38	0,85
Fe <sub>общ</sub>	55,2	55,1	54,9	42,2
C	3,5	14,4	3,5	16,1
Технический анализ ПУТ	Наименование		№1 (1.05–10.05)	(16.05–31.05)
	A		10,5	10,5
	ЛВ		28,8	28,4
	S		1,02	1,02

ние рефлексy).

Морфология частиц кокса определялась макро- и микропористостью. Размер пор, соответственно, колебался от миллиметров до микрон. Почти полностью они сложены поликристаллическими агрегатами графита с размером частиц в несколько микрон. Кокс содержал большое количество обломков аналогичного состава скрытокристаллической структуры с субмикроскопической зернистостью (выглядят изотропными), а также включения шлакообразующих компонентов и фрагментов с реликтовой клеточной структурой. Часть пустот покрыта корочками перекристаллизованного графита толщиной в сотые доли мм.

Термическое воздействие приводит к графитизации частиц кокса с поверхности и образованию новых пор. Отражательная способность графита  $R_0 = 22\%$ , двуотражение очень сильное, с изменением цвета от коричневатого до сине-серого. Частицы пылеугольного топлива сложены бесструктурным витринитом-однородным гелефицированным изотропным компонентом. Изредка встречается структурный витринит, содержащий остатки растительной структуры. Форма частиц угловатая, с количеством сторон от трех до пяти и сравнительно ровными ограничениями. Поры отсутствуют.

Отражательная способность зависит от марки угля. Отражательная способность витринита угля

( $R_0$ ) по ГОСТу Украины 1996 г. составляет: для газового угля 7,3-8,8 %; для тощего угля 10,1-12,3 %. По этому показателю, а также по изотропности он существенно отличается от кокса. Существенное значение имеет сравнительно широкий диапазон значений  $R_0$  при небольшом разрыве между марками угля. В процессе дегазации потеря летучих компонентов сопровождается изменением  $R_0$ . Создается впечатление, что уголь марки Т при нагревании преобразуется по типу кокса, испытывая графитизацию с увеличением отражательной способности. На определенной стадии по оптическим свойствам он может приблизиться к коксу. При этом сохраняются отличия от кокса по особенностям микроструктуры и морфологии. Такой уголь следует отнести к частично использованному.

Частично использованный уголь марки Г отличается пониженной, по сравнению с исходным, отражательной способностью. Возможно, на ранней стадии преобразования потеря летучих компонентов и термическая диссоциация ведут к формированию субмикроскопических пор, понижающих этот показатель. Подобное явление наблюдается на конечных стадиях преобразования кокса.

Рудные компоненты представлены магнетитом  $Fe_3O_4$  и гематитом  $Fe_2O_3$ . Магнетит чаще всего образует сростки неправильных зерен размером 30 мкм и менее. Включения магнетита в стеклообразных образованиях имеют вид правильных кристаллов, замещае-

мых гематитом. Гематит количественно преобладает над магнетитом.

Шлакообразующие компоненты представлены остаточным кварцем, карбонатами, а также силикатами. Последние образуют правильные кристаллы в массе силикатного стекла, образующего и самостоятельные частицы. Отражательная способность этих компонентов варьирует в зависимости от содержания железа. Стеклообразные частицы могут иметь отражательную способность, близкую к нулю, однако они отличаются серыми или ярко красными (за счет оксидов железа) внутренними рефлексиями, в то время, как в угле они не наблюдаются. Существуют и морфологические отличия.

Определены объемные проценты указанных компонентов линейным методом. Этот метод основан на том, что отношения площадей, занимаемых сечениями зерен в плоскости шлифа, пропорциональны отношению длин линий, пересекающих эти сечения. В свою очередь от-

**Таблица 2. Содержание основных компонентов в шламе газоочистки на ДП № 1 ПрАО «ДМЗ», объемные %**

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообр. компоненты
Без номера 1-10 мая 2010 г.	А	2,08	—	64,79	33,13
	Б	2,61	—	67,80	29,59
	среднее	2,34	—	66,30	31,36
1 16, 27, 29 мая 2010 г.	А	3,65	0,01	75,28	21,06
	Б	3,50	0,01	74,07	22,42
	среднее	3,57	0,01	74,68	21,74
2 18, 23, 24, 30 мая 2010 г.	А	2,93	—	65,75	31,32
	Б	3,57	0,03	72,93	23,47
	среднее	3,25	0,015	69,35	27,39
1, 2	среднее	3,41	0,012	72,02	24,56

**Таблица 3. Содержание основных компонентов в колошниковой пыли на ДП № 1 ПрАО «ДМЗ», объемные %**

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообр. компоненты
Без номера 1-10 мая 2010 г.	А	18,68	0,19	46,93	34,20
	Б	23,53	0,14	39,52	36,81
	среднее	21,10	0,16	43,24	35,50
№ 1 16, 27, 29 мая 2010 г.	А	28,73	0,05	34,91	36,31
	Б	26,80	0,07	34,79	38,35
	среднее	27,76	0,06	34,84	37,34
№ 2 18, 23, 24, 30 мая 2010 г.	А	33,69	0,13	37,79	28,39
	Б	28,22	0,06	36,74	34,98
	среднее	30,96	0,09	37,27	31,69
№ 3 19, 20, 22, 31 мая 2010 г.	А	29,74	0,12	35,44	34,71
	Б	33,46	0,19	36,88	29,47
	среднее	31,60	0,15	36,16	32,09
Среднее проб № 1, 2, 3	среднее	30,11	0,10	36,09	33,70

ношения площадей сечений пропорциональны отношению объемов зерен. Измерения проводились с применением окуляра-микрометра. Брикет перемещался с помощью координатного препаратопроводителя, снабженного линейками с нониусами, так, чтобы измерение сечений зерен выполнялось по системе параллельных линий через 1 мм. Результаты подсчетов основных компонентов, содержащихся в шламе газоочистки и колошниковой пыли, отобранных на ДП-1, приведены в табл. 2, 3.

Сходимость результатов контролировалась измерениями на двух половинах брикетов – А и Б. Из табл. 2 видно, что в шламе газоочистки преобладают оксиды железа (до 72 %) и шлакообразующие (до 25 %). Содержание кокса и угля составляет 3,4 и 0,012 %. В колошниковой пыли содержится примерно одинаковое количество оксидов железа (36 %), шлакообразующих компонентов (34 %) и кокса (30 %). Содержание частиц угля в колошниковой пыли на порядок выше, чем в шламе и составляет 0,1%.

Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли (см. табл. 1) качественно подтверждает более низкое содержание углерода в шламе (3,5 %) по сравнению с углеродом колошниковой пыли (14-16 %). Анализ результатов подсчета показывает удовлетворительную сходимость данных. Размер частиц шлама газоочистки пыли, независимо от их состава, колеблется от долей микрон до 25 мкм. Частицы колошниковой пыли крупнее – до 50 мкм; небольшая часть достигает размеров 80–100 мкм.

Углеродсодержащие компоненты в шлаке не обнаружены. Стекловатая масса содержит поры размером от долей микрон и крупнее, а также тончайшие капельки металла. Наблюдается начало процесса рекристаллизации в виде тончайших дендритов и сростков удлиненных кристаллов силикатов. Исследования полностью подтвердили выводы субъективного анализа и наблюдений, свидетельствующих о высокой степени газификации ПУТ в ДП. Из табл. 2, 3 видно, что свыше 99 % углерода ПУТ газифицируется в ДП. Принимая во внимание изложенное, очевидно, что в сложившихся в ПрАО «ДМЗ» технологических условиях полнота газификации ПУТ не является регламентирующим элементом технологии.

### **Выводы**

Получила дальнейшее развитие методика определения полноты сгорания ПУТ в фурменной зоне доменной печи, основанная на балансе углерода продуктов плавки и выборе оптимальных диагностических свойств частиц кокса и несгоревшего угля. Установлены диагностические признаки, позволяющие наиболее точно и объективно оценить происхождение углеродистой частицы: морфологические

(макро- и микропористость), микроструктурные (зернистость, наличие включений), оптические (двуотражение, эффект поляризации, степень анизотропии). При этом, наибольшее содержание углерода ПУТ обнаружено в колошниковой пыли (% объемные) – 0,16, наименьшее в шламе – 0,012 и в шлаке – следы. Перспективным является автоматизация отбора проб с целью непрерывного контроля полноты сгорания угля для обеспечения стабильной и наиболее эффективной работы доменной печи.

### **Библиографический список**

1. Доменное производство: Справочное издание в 2-х т. Под ред. Вегмана Е.Ф. – М.: Metallurgy, 1989. – Т. 1. – 495 с.
2. Zhang S., Bi X. Theoretical consideration of problems relating to high coal rate injection into blast furnaces // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2003. – V. 30. – №. 6. – P. 467-474.
3. Zhang S., H.Yin The Trends of Ironmaking Industry and Challenges to Chinese Blast Furnace Ironmaking in the 21st Century // *The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI'99)*. – Shanghai (China). – 2009. – P. 2-15.
4. Helleisen M., Nicolle L., Metz B. Sondages dans l'homme mort du haut fourneau a travers une tuyere // *Revue de la metallurgy*. – 1987. – V. 84. – № 11. – P. 747-758.
5. Kahji T., Seyi T., Takao H., e.a. Sideways tuyere probe for measuring blast furnace raceway zone // *Kawasaki Steel Nechn. Rept.* – 1998. – № 19. – P. 123-125.
6. Бабич А. И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. – К.: Техника, 1993. – 200 с.
7. Wu K., Pan W., Hu W. Research of utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI Rate // *Steel Research Int.* – 2008. – №. 12. – P. 904-907.
8. Глушенко И.М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых. – М.: Metallurgy, 1990. – 296 с.
9. Определение степени сгорания пылеугольного топлива в доменной печи № 2 ЗАО «Донецксталь» - металлургический завод / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко и др. // *Наук. пр. Донецького НТУ. Серія: Metallurgy. Вип. 12 (177)*. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С. 56-65.

**Поступила 07.03.2013**