

# КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ СГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПО АНАЛИЗУ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ

**В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко**

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, kochura@ukr.net*

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из важнейших условий использования пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке является обеспечение его полного сгорания в пределах фурменных зон. Поэтому контроль степени сгорания ПУТ является важной задачей.

Количественный метод определения полноты сгорания топлива в фурменных зонах разработан проф. С.Л. Ярошевским и испытан на доменных печах (ДП) Донецкого металлургического завода [1,2]. Эксперименты по определению полноты сгорания ПУТ проводили с помощью водоохлаждаемой трубы-зонда. Расход ПУТ во время исследований составлял 50, 100 и 150 кг/т чугуна. Микроструктурный анализ большого количества проб материалов, отобранных из различных точек горна, показал, что уже на срезе фурм размер частиц угольной пыли уменьшается. Полное сгорание пылеугольного топлива происходит на расстоянии 0,6-0,8 м от среза фурмы. Интенсивное горение пылеугольного топлива начинается еще до его поступления в фурменную зону: на срезе фурмы сгорает 50-70% топлива. При увеличении расхода ПУТ значительно расширяется зона распространения частиц топлива в горне.

Методика исследования полноты сгорания ПУТ в доменной печи по анализу

продуктов плавки основана на идентификации и количественной оценке несгоревших частиц углерода ПУТ, вынесенных из доменной печи в составе колошниковой пыли, шламов и шлака. Указанная методика опробована и применяется в отечественной и зарубежной практике [3-6].

Исследованием степени сгорания ПУТ, проведенным с использованием петрографического анализа продуктов плавки на мощных (более 4000 м<sup>3</sup>) доменных печах комбината Баостил, (Китай), показана 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 доменной печи [4].

Для контроля полноты сгорания ПУТ в условиях фурменных зон ДП-1 и ДП-2 полезным объемом 1033 м<sup>3</sup> ПрАО «Донецксталь» - металлургический завод» (ПрАО «Донецксталь» - МЗ») использовался петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в колошниковой пыли и шлаке, а также химический анализ доменного шлака и колошниковой пыли. Промышленная эксплуатация пылеугольного комплекса на ПрАО «Донецксталь» - МЗ» начата в сентябре 2002 г. Конструкция основной и модернизированной установки для приготовления ПУТ описана ранее [7].

На первом этапе исследований ДП-1 выплавляла передельный чугун из привозных агломератов и окатышей, доля последних в шихте изменялась от 35 до 65 %. Для повышения стабильности химического состава железорудной шихты в качестве основных компонентов использовали окатыши ОАО «ЛебГОК» и агломерат ОАО «ЮГОК», а в качестве основного топлива - кокс Донецкого участка Рутченковского КХЗ. ДП-1 работала без вдувания ПУТ, а ДП-2 с вдуванием 90-130 кг ПУТ на 1 т чугуна.

Показатели качества ПУТ характеризовались высокой тониной помола (30-50 мкм),

низкой и устойчивой влажностью (менее 1%).

Суть метода подробно изложена в работах [8-10] и состоит в определении частичек углерода кокса и ПУТ, которые имеют различную форму и размеры, в продуктах доменной плавки с помощью петрографического анализа с применением методов рудной микроскопии и углепетрографии.

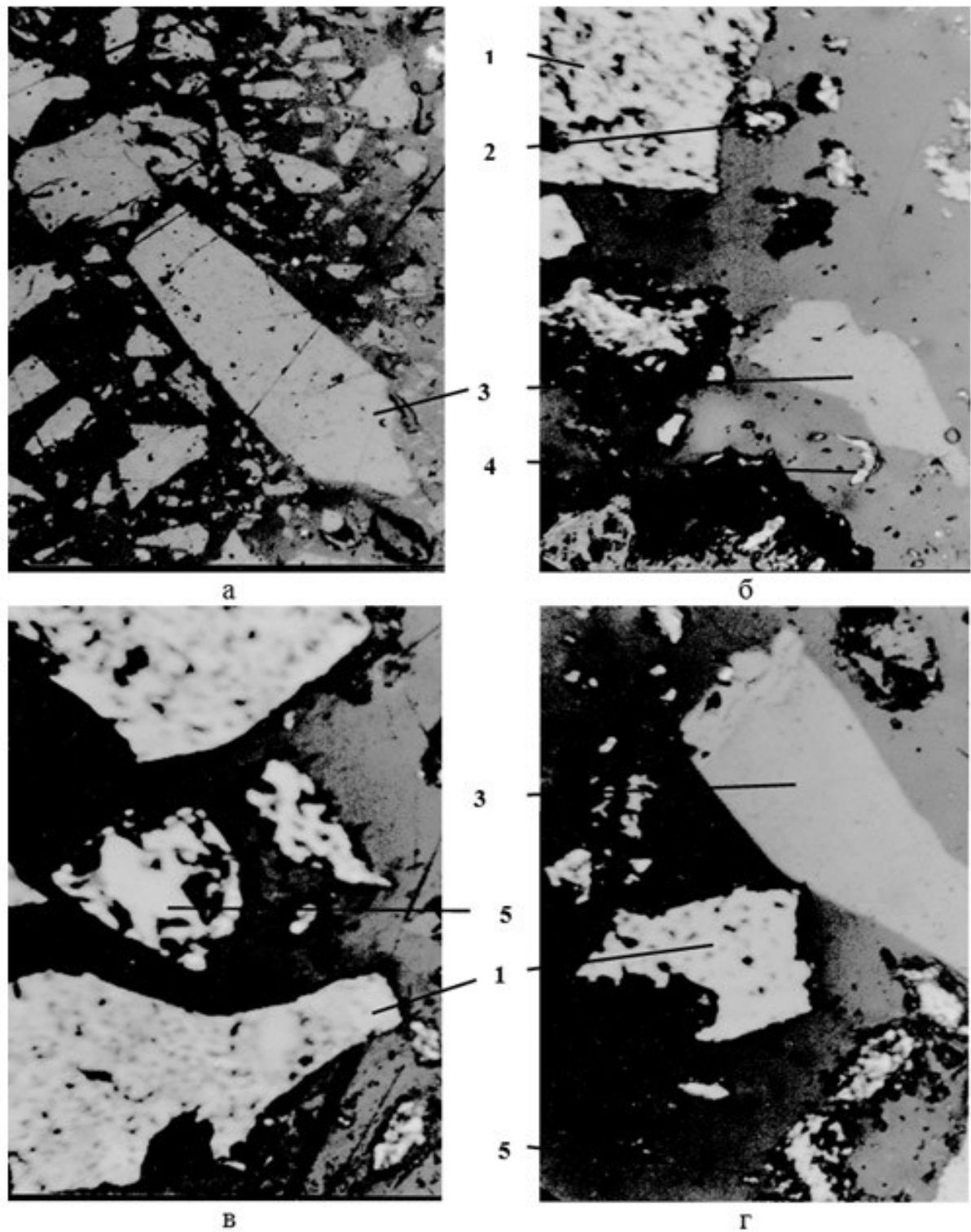
В петрографических исследованиях степени сгорания ПУТ в доменной печи применялся рудный микроскоп, позволяющий определять следующие диагностические свойства: коэффициент отражения (отражательная способность) и его дисперсию; эффекты поляризации; осьность и оптический знак; окраску; относительную твердость; микрохрупкость; микропластичность; магнитность; форму и размер зерен (кристаллов). Методика исследования основывалась на определении оптических и других свойств минералов (их искусственных аналогов и некристаллических фаз), а также морфологии, структуры, степени кристалличности [11,12].

Объектом исследования являлся полированный шлиф площадью 1-2 см<sup>2</sup>, изготовленный на основе эпоксидной смолы из пробы анализируемого материала (угля, кокса, колошниковой пыли и шлака). Микроструктура шлифа ПУТ и колошниковой пыли приведена на рис.1.

При микроскопическом изучении выполнялся подсчет объемных процентов содержания основных компонентов. Использовался один из общепринятых при минералогическом анализе – линейный метод. Вдоль системы параллельных линий, расположенных через 1 мм, подсчитывали суммарную длину пересечений каждого компонента. Объемный процент компонента определяли по сумме длин пересечений, деленной на общую длину пересечений всех компонентов.

Результаты подсчетов основных компонентов, содержащихся в колошниковой пыли, отобранной на ДП-1, работающей без вдувания ПУТ и ДП-2 – с вдуванием 90-130

кг ПУТ на 1 т чугуна, приведены в таблице 1.



а – ПУТ, б и г – колошниковая пыль ДП-2, в - колошниковая пыль ДП-1; 1 – кокс, 2 –  $Fe_2O_3$ ; 3 – уголь, 4 – графит, 5 –  $Fe_3O_4$

Рисунок 1 - Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (x 537)

Таблица 1 - Основные компоненты колошниковой пыли

Компоненты	Содержание, объемное, %	
	ДП - 2	ДП - 1
Кокс	68,5	71,6
Магнетит	3,6	2,9
Магнетит в стекле	6,8	8,8
Магнетит с гематитом	4,1	4,9
Стекло с включениями металла	8,3	6,8
Рекристаллизованные шлакообразующие компоненты	3,5	3,7
Уголь	0,8	-
Графит	1,3	-
Лимонит	0,6	0,5
Карбонаты	0,5	0,8

Из табл.1 видно, что в колошниковой пыли преобладает кокс (до 70%) в виде частичек размером в десятые-сотые доли миллиметров, в различной степени графитизированный. В этом отношении он не отличается от пылеватых частиц кускового кокса. Второй по распространенности компонент – магнетит, чаще всего встречающийся со шлакообразующими компонентами (стекло и поликристаллические образования). Микроструктура свидетельствует о его образовании при перекристаллизации шихты в пластичном состоянии или при кристаллизации (кристаллы в массе стекла) или при кристаллизации из силикатного расплава (дендриты).

Магнетит нередко замещается гематитом – частично или полностью. Шлакообразующие компоненты в виде стекла или поликристаллических масс часто содержат микроскопические капли металла (1 – 10 мкм).

Частицы угольной пыли практически не отличаются от исходного пылеугольного топлива. В отличие от кокса частицы угля не содержат пор и не графитизированы. Их отражательная способность и твердость значительно ниже, чем у кокса. Графит в виде пластинок размером до  $0,4 \times 0,02$  мм не связан с другими компонентами и по морфологии резко отличается от графитизированных корочек на коксе. В небольшом количестве отмечается карбонат (ромбоэдрические осколки по спайности до 0,2 мм) и лимонит

( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Соотношение объемов углеродсодержащих компонентов в колошниковой пыли составляет соответственно, %: кокс – 96,9; уголь – 1,2; графит – 1,9.

Микроструктура колошниковой пыли, отобранной на ДП-1, отличалась отсутствием несгоревшего угля и графита.

Вынос углерода с колошниковой пылью определялся расчетным путем по данным выноса колошниковой пыли и химическому анализу в ней углерода. Вынос колошниковой пыли за время исследования изменялся в диапазоне 73 - 194 т/т чугуна на ДП-1 и 72 - 145 т/т чугуна на ДП-2, а содержание углерода в колошниковой пыли от 7,4 до 19,07 %. Вынос углерода с колошниковой пылью на тонну кокса на ДП-2 оставался ниже или незначительно превышал вынос углерода на ДП-1, что свидетельствовало о достаточно полной газификации углерода ПУТ в фурменных зонах ДП-2.

Исследования содержания углерода в доменном шлаке при вдувании ПУТ на ДП-2 и без вдувания ПУТ на ДП-1 проводились на основании химического анализа шлака на углерод и петрографического анализа. Незначительный прирост содержания углерода в шлаке на 0,004-0,033 % при вдувании ПУТ свидетельствует, что процесс горения угольных частиц в фурменных зонах не ухудшился, сохранился на достаточно высоком уровне.

На втором этапе исследований ДП-1 работала на окатышах СевГОК (1557 кг/т чугуна): производительность печи составляла 2000 т/сутки, расход кокса «Премиум» – 422 кг/т чугуна; ПУТ – 135 кг/т чугуна, железоблюса – 64 кг/т чугуна; расход известняка – 147 кг/т чугуна.

Во время эксперимента вдувалось ПУТ, приготовленное из смеси газового и тощего угля в соотношении 3:2. Показатели качества 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, пылеугольного топлива и кокса, а также аншлифы, изготовленные из образцов шлака, отобранных в тот же период.

Химический анализ продуктов плавки ДП-1 приведен в табл. 2.

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. Отражательная способность графита  $R_o=22\%$ , двуотражение очень сильное, с изменением цвета от коричневатого до сине - серого. Термическое воздействие приводит к графитизации частиц кокса с поверхности и образованию новых пор.

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.

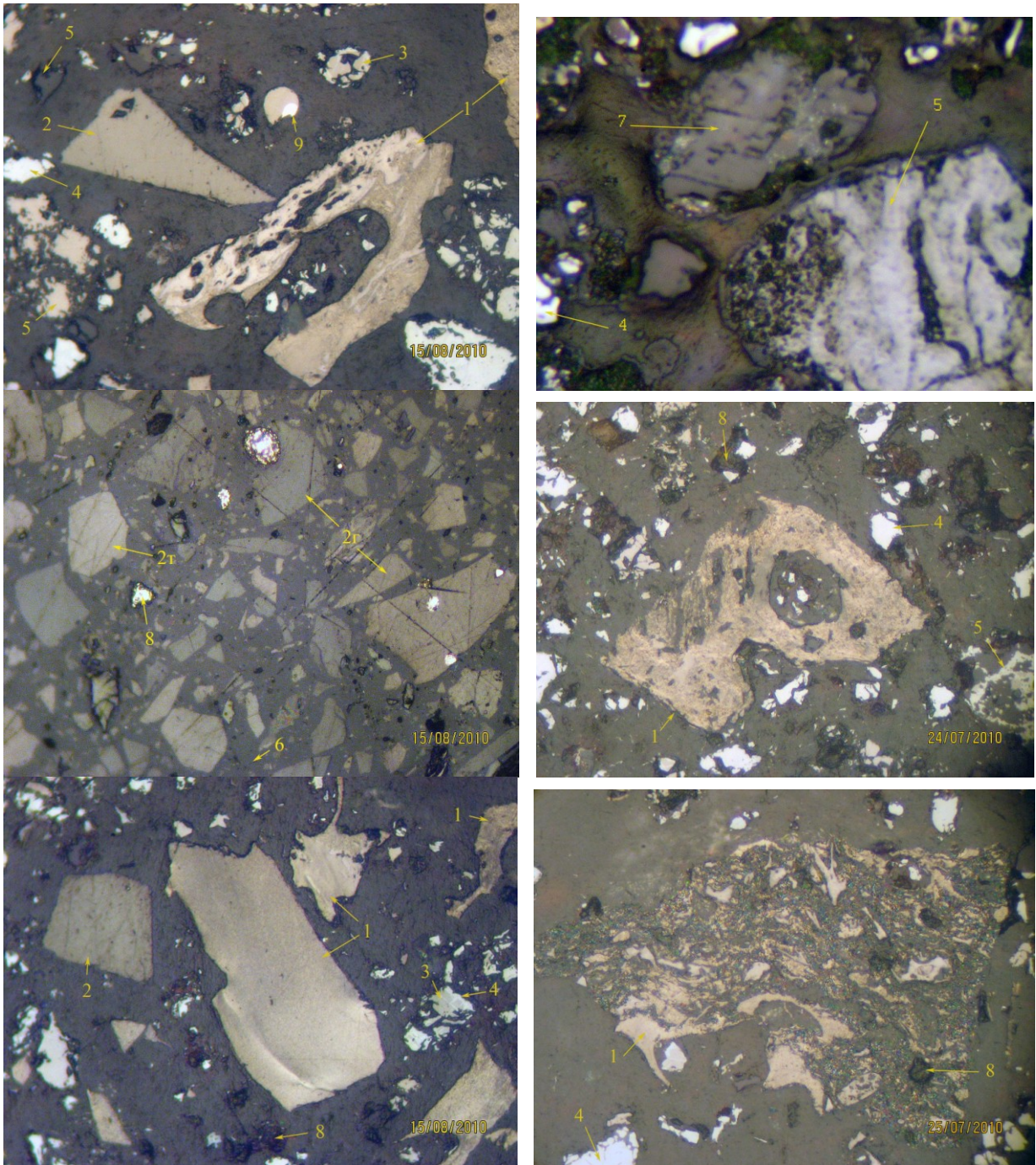
Отражательная способность витринита зависит от марки угля. Так, по ГОСТу Украины 1996 г.  $R_o$  для газового угля составляет 7,3 – 8,8; для тощего угля 10,1 – 12,3%. По этому показателю, а также по изотропности он существенно отличается от кокса.

Таблица 2 - Анализ проб шлака, шлама, колошниковой пыли и пылеугольного топлива, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ на ДП №1 ПрАО «Донецксталь» – МЗ»

Таблица А – Химический анализ шлаков и соответствующих им чугунов				
Наименование	Шлак			
	№1	№2	№3	
[Si]	0,51	0,62	0,65	
[Mn]	0,1	0,1	0,1	
[S]	0,03	0,04	0,03	
[P]	0,02	0,02	0,03	
(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	
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,16	1,22	1,12	
Таблица Б – Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли				
Наименование	Шлам №1	Колошниковая пыль №1	Шлам №2	Колошниковая пыль №2
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
MnO	0,168	0,19	0,154	0,18
Fe <sub>общ</sub>	55,2	55,1	54,9	42,2
FeO	11,5	10,6	8,8	9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,5	66,2	63,7	49,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,2	0,38	0,85
ППП	3,5	14,7	3,9	19
TiO <sub>2</sub>	0,42	0,56	0,72	0,56
C	3,5	14,4	3,5	16,1
S	0,42	0,12	0,72	0,169
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,36	0,16	0,16	0,16
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,34	0,07	0,23
K <sub>2</sub> O	0,24	0,7	0,11	0,46
Zn	0,11	0,13	0,18	0,13
Таблица В – Технический анализ ПУТ				
Наименование	№1		№2	
A	10,5		10,5	
ЛВ	28,8		28,4	
S	1,02		1,02	

На рис. 3 визуально прослеживается отличие газового угля от тощего по отражательной способности (тощий уголь кажется светлее).





1 – кокс; 2 - уголь; 2Г – уголь тощий; 2Г – уголь газовый; 3 - магнетит; 4 – гематит;  
5 – силикаты; 6 – эпоксидная матрица; 7 – карбонаты; 8 – поры; 9 – металл

Рисунок 3 - Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (размер кадра по горизонтали составляет 0,125мм)

По причине низкой твердости частицы угля выделяются среди других компонентов обилием тонких царапин, от которых трудно избавиться при полировке.

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  $T$  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  $G$  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, замещаемых гематитом (рис.3). 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 рефлексами, в то время, как в угле они не наблюдаются. Существуют и морфологические отличия.

Все перечисленные компоненты встречаются как в виде отдельных частиц, так и в

виде плотных комочков, составляющих единый агрегат. По всей вероятности это осколки железорудных окатышей.

Определено объемное содержание (%) 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 отношения 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.3. Сходимость результатов контролировалась измерениями на двух половинах брикетов – А и Б.

Из табл. 3 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% (табл.3).

Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли (табл. 2Б) 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.

Таблица 3 - Содержание основных компонентов на ДП-1 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», об. %

В шламе газоочистки					
Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера	А	2,08	–	64,79	33,13
	Б	2,61	–	67,80	29,59
	среднее	2,34	–	66,30	31,36
№1	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	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
Среднее проб №1,2	среднее	3,41	0,012	72,02	24,56
В колошниковой пыли					
Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера	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	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	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	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

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 доменной печи: об этом свидетельствуют высокий уровень основных ТЭП плавки, минимальные простои

и горение воздушных фурм, достаточные стабильность и устойчивость технологического процесса.

Результаты петрографических исследований показали, что содержание углерода ПУТ в шлаке – следы; в колошниковой пыли – 0,1 и шламе – 0,012 % (об.). Это значит, что свыше 99 % углерода ПУТ газифицируется в ДП. Это является достаточно высоким результатом.

### **Выводы**

Эффективность применения ПУТ в доменной плавке определяется условиями его сгорания в печи.

Для контроля степени сгорания пылеугольного топлива в доменной печи предлагается использовать петрографический и химический анализ продуктов плавки, основанный на идентификации и количественной оценке несгоревших частиц углерода ПУТ, вынесенных из доменной печи в составе колошниковой пыли, шлама и шлака.

Проведенные петрографические и химические исследования полноты сгорания ПУТ по анализу продуктов плавки на доменных печах ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод» показали достаточно полную 99 % (объемные) степень газификации частиц угля при расходах ПУТ 90 - 130 кг/т чугуна.

1. Ярошевский, С.Л. Изучение процесса горения дополнительного топлива в фурменных зонах доменной печи / С.Л. Ярошевский С.Л., А.Т.Анисимов // *Сталь*. – 1985. - №2. – С.9-13.
2. Ярошевский, С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С. Л.Ярошевский. – М.: *Металлургия*, 1988. – 176 с.
3. Бабич, А. И. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке / А. И. Бабич, С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко. – К.: *Техника*, 1993. – 200 с.
4. Wu, K. Research of utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI Rate/ K.Wu,

- W.Pan, W.Hu, et al.//Steel Research Int. – 2008. – No.12. – P.904-907.*
5. *Shen, F. Technology progress and strategy in blast furnace ironmaking in China / F.Shen, T. Yang, B. Gao // Steel Research International. – 2005. – V.76. – No.10. – P.676-682.*
  6. *Wu, K. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at Capital Steel Co./ K. Wu, R. Ding, Q.Han, et al.// ISIJ International, Vol. 50 (2010). – No. 3. – P. 390-395.*
  7. *Рыженков, А.Н. Технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом/ А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский, Б.П.Крикунов, В.М. Замуруев, В.Е. Попов, В.В. Кочура // Сталь.- 2005 . – №12. – С. 3-6.*
  8. *Кочура, В. В. Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи №1 ПАО «Донецксталь» - металлургический завод / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.Е. Попов и др. // Металл и литье Украины, №9-10, 2011. – С. 16-21.*
  9. *Кочура, В. В. Совершенствование методики определения степени газификации пылеугольного топлива в доменных печах / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2013. - №4. - С. 3-6.*
  10. *Кочура, В.В. Методика определения степени сгорания пылеугольного топлива в доменных печах / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко и др. // Металлург. - 2013. - № 8. - С. 9-14*
  11. *Перепелицин, В.А. Основы технической минералогии и петрографии. – М.: Недра, 1987.- 255с.*
  12. *Юшко, С.А. Методы лабораторного исследования руд. - М.: Недра, 1984.-389с.*