

УДК 669.162.2

**В. В. Кочура, С. Л. Ярошевский, В. Е. Попов\*, В. И. Купенко,  
А. В. Храпко\*, С. А. Иванов\*, В. В. Брага\***

Донецкий национальный технический университет, Донецк

\*ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», Донецк

### **Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи №1 ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод»**

*Приведены исследования полноты сгорания пылеугольного топлива, вдуваемого в горн доменных печей, на основании петрографического анализа продуктов доменной плавки.*

**Ключевые слова:** уголь, ПУТ, кокс, колошниковая пыль, шлак, шлак, доменная печь

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из важнейших условий вдувания больших расходов пылеугольного топлива (ПУТ) в доменную печь является обеспечение его полного сгорания в пределах фурменных зон. Поэтому изучение степени газификации ПУТ является важной задачей.

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 [1-4].

Исследованием полноты 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 [2].

Целью статьи является определение полноты сгорания ПУТ в доменных печах на основании петрографического анализа продуктов доменной плавки.

Для определения полноты сгорания ПУТ на доменной печи №1 (ДП-1) доменного цеха ПрАО «Донецксталь» – МЗ» в мае 2010 г. использовался петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в продуктах доменной плавки: колошниковой пыли, шламе и шлаке.

Суть метода подробно изложена в работе [18] 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.

Доменная печь в указанный период работала эффективно 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 характеризуются 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, отобранных 1-31.05.2010г. Для сравнения также были

изготовлены брикеты из угольной пыли и кокса. Исследованы также аншлифы, изготовленные из образцов шлака, отобранных в тот же период.

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

Химический анализ продуктов плавки: проб шлака, шлама, колошниковой пыли и пылеугольного топлива, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ на ДП №1 ПрАО «Донецксталь»–МЗ» приведен в табл. 1.

Микроструктура шлифов колошниковой пыли и ПУТ приведена на рис. 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 наблюдается цвет просвечивающих компонентов, обычно серых в отраженном свете (внутренние рефлексy).

Морфология частиц кокса определяется макро - и микропористостью. Размер пор соответственно колеблется от миллиметров- долей миллиметров до микрон. Почти полностью они сложены поликристаллическими агрегатами графита с размером частиц в несколько микрон. Кокс содержит 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  $R_0=22\%$ , 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 зависит от марки угля. Отражательная способность витринита угля ( $R_0$ ) по ГОСТу Украины 1996г. 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. На рис. 1 визуально прослеживается отличие газового угля от тощего по отражательной способности (тощий уголь кажется светлее). 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 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, замещаемых гематитом (рис.1). 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.

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 отношения площадей сечений пропорциональны отношению объемов зерен. Измерения проводились с применением окуляра – микрометра. Брикет перемещался с помощью координатного препаратоводителя, 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 доменной печи №1, приведены в табл.2,3. Сходимость результатов контролировалась измерениями на двух половинах брикетов – А и Б. Из таблицы 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 (табл. 3б) 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 удлинённых 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.

Особенности работы доменной печи при низкой степени газификации ПУТ детально описаны в технической литературе [5-7].

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

Принимая во внимание изложенное, очевидно, что в сложившихся на ПрАО «Донецксталь»–МЗ» технологических условиях полнота газификации ПУТ не является регламентирующим элементом технологии. Определяющим элементом технологии в настоящее время остается газодинамика печи, узкими местами которой являются высокий выход горновых газов на 1 т чугуна, низкое давление газов печи, высокий расход на 1 т чугуна известняка и, главное - низкое качество (по прочности и содержанию мелочи 0-5 мм) окатышей СевГОК.

### **Выводы**

Проведенные петрографические исследования полноты сгорания ПУТ на доменной печи №1 ПрАО «Донецксталь» – МЗ» по анализу продуктов доменной плавки показали достаточно полную 99% (объемные) степень газификации частиц угля при расходах ПУТ 135 кг/т чугуна.

Опыт ПрАО «Донецксталь» – МЗ» показывает, что освоение пылеугольной технологии при расходе ПУТ 100-150 кг/т чугуна и снижение расхода кокса до 400 кг/т чугуна для условий доменных печей Украины не представляется проблематичным.

### **Литература**

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. Кочура, В. В. Определение степени сгорания пылеугольного топлива в доменной печи №2 ЗАО «Донецксталь» – металлургический завод» / В. В. Кочура, С. Л. Ярошевский, В. И. Купенко и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. Випуск 12 (177) – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С. 56-65.
  5. Ярошевский, С. Л. Применение пылеугольного топлива для выплавки чугуна / С. Л. Ярошевский, А. И. Рябенко, А. Л. Антонов и др. – К.: Техника, 1974. – 186 с.
  6. Ярошевский, С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С. Л. Ярошевский. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.
  7. Бабич, А. И. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке / А. И. Бабич, С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко. – К.: Техника, 1993. – 200 с.

*Кочура В. В., Ярошевський С. Л., Попов В. Є., Купенко В. І., Храпко А. В., Іванов С. А., Брага В. В.*

Дослідження повноти згорання пиловугільного палива в доменній печі №1 ПрАТ «Донецьксталь»–металургійний завод»

*Наведено дослідження повноти сгорання пиловугільного палива, що вдувається до горна доменних печей, за петрографічним аналізом продуктів доменної плавки*

**Ключові слова:** *вугілля, ПВП, кокс, колошниковий пил, шлам, шлак, доменна піч*

*Kochura V.V., Yaroshevskiy S.L., Popov V.E., Kupenko V.I., Khrapko A.V., Ivanov S.A., Braga V.V.*

Investigations of degree of pulverized coal combustion in blast furnace No 1 “Donetskstal” – metallurgical Works”

*Investigation of pulverized coal combustion injecting into hearth of the blast furnaces with petrography analysis of blast furnace products was described.*

**Keywords:** *coal, PC, blast furnace dust, sludge, slag, blast furnace*

Таблица 1

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

Таблица 1 А – Химический анализ шлаков и соответствующих им чугунов			
Наименование	Шлак		
	№1 (16.05.2010)	№2 (19.05.2010)	№3 (30.05.2010)
[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 1 Б –Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли				
Наименование	Шлам №1 (1.05.10– 10.05.10)	Колошниковая пыль №1 (1.05.10– 10.05.10)	Шлам №2 (16.05.10– 31.05.10)	Колошниковая пыль №2 (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
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 1 В – 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

Таблица 2

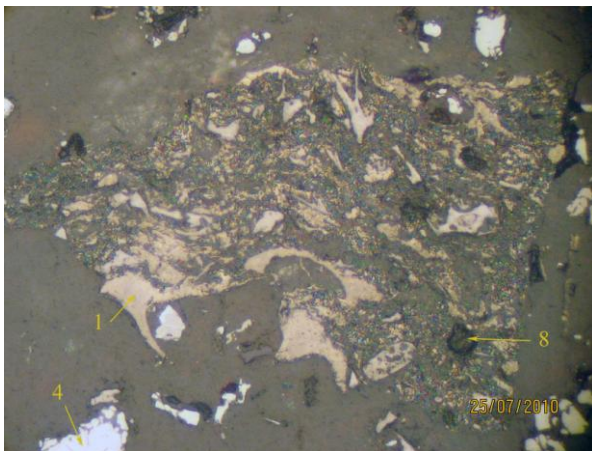
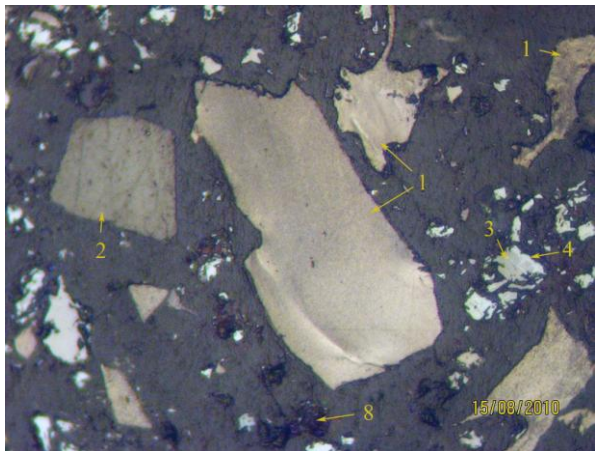
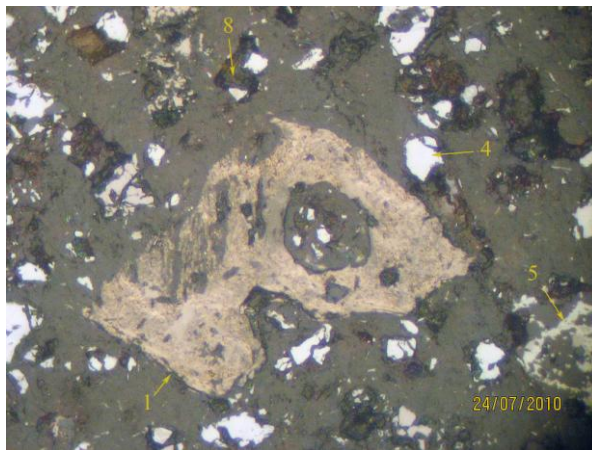
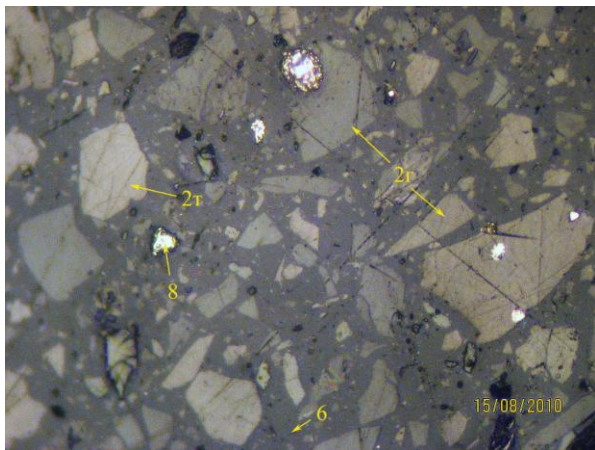
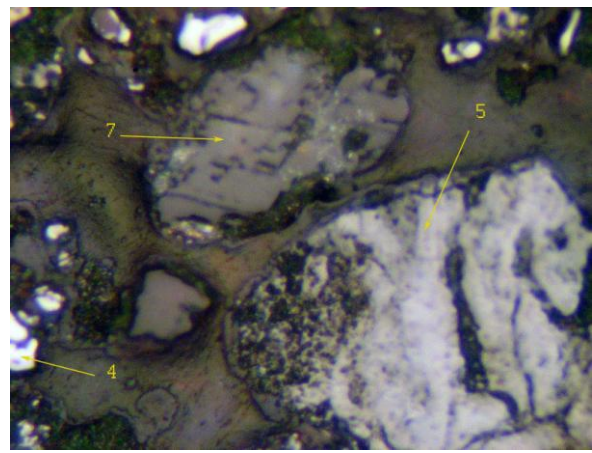
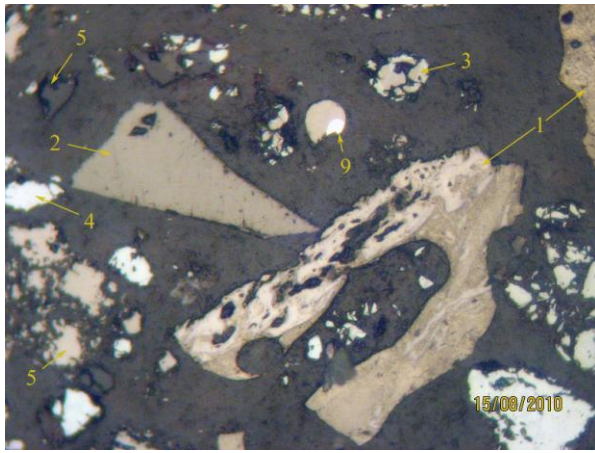
**Содержание основных компонентов в шламе газоочистки на ДП №1 ЗАО «Донецксталь»–МЗ», объемные %**

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
<b>1,2</b>	<b>среднее</b>	<b>3,41</b>	<b>0,012</b>	<b>72,02</b>	<b>24,56</b>

Таблица 3

**Содержание основных компонентов в колошниковой пыли на ДП №1 ЗАО «Донецксталь»–МЗ», 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
<b>1,2,3</b>	<b>среднее</b>	<b>30,11</b>	<b>0,10</b>	<b>36,09</b>	<b>33,70</b>



**Рисунок 1** - Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (размер кадра по горизонтали составляет 0,125мм)

1 – кокс; 2 - уголь; 2<sub>т</sub> – уголь тощий; 2<sub>г</sub> – уголь газовый;  
 3 - магнетит; 4 – гематит; 5 – силикаты; 6 – эпоксидная матрица; 7 – карбонаты; 8 – поры; 9 – металл