

УДК 669.162.2

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

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ №2 ЗАО «ДОНЕЦКСТАЛЬ» - МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

Для контроля полноты сгорания пылеугольного топлива, вдуваемого в горн доменных печей, предлагается использовать петрографический анализ содержания несгоревших угольных частиц в колошниковой пыли и шлаке, а также химический анализ доменного шлака и колошниковой пыли.

Ключевые слова: ПУТ, уголь, фурменная зона, колошниковая пыль, доменная печь

### **Постановка задачи**

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.

### **Анализ публикаций по теме исследования**

Для экспериментального анализа сгорания ПУТ в фурменной зоне доменной печи применяют различные способы и устройства.

Одним из таких методов является скоростная киносъемка фурменной зоны [1,2]. Так, в США с помощью киносъемки установлено, что частицы угольной пыли сгорают на расстоянии 300-400 мм от носка фурмы [2]. Аналогичные результаты получены в Китае при вдувании в горн 270 кг ПУТ на 1 т чугуна [3]. Применяемая в США аппаратура для определения полноты сгорания очень сложна и обеспечивает лишь качественную оценку.

Наиболее достоверные результаты могут быть получены зондированием горна с непосредственным отбором проб материалов.

Институтом IRSID совместно с фирмой "Solmer" разработано и внедрено устройство для зондирования горна доменной печи трубой диаметром 90 мм с гидравлическим усилителем до 10 т на глубину 6 м [4,5].

На доменной печи №5 завода Chiba фирмы "Kawasaki Steel" установлен косой зонд, который вводят через отводную трубку, примыкающую к соплу, под углом к оси фурмы [6]. Это позволило исключить нарушение процессов в зоне циркуляции при вводе зонда, а также проводить замеры в пространстве между соседними фурменными зонами. Замеры можно производить на расстоянии до 3 м от фурмы. С помощью зонда можно отбирать пробы газа, пыли, расплавленного металла и шлака, замерять температуру, а также проводить наблюдения за состоянием внутри доменной

печи с использованием оптического волокна и телекамеры. Имеется возможность ввода зонда под углом через соседнюю фурму [7-9].

Количественный метод определения полноты сгорания топлива в фурменных зонах разработан проф. С.Л. Ярошевским и испытан в условиях Донецкого металлургического завода [10]. 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.

Известны также способы косвенного определения полноты сгорания угольной пыли аналитическим способом и по анализу продуктов плавки [11-17].

### **Цель статьи**

Целью статьи является разработка методики контроля полноты сгорания ПУТ в доменных печах по содержанию углерода в продуктах плавки.

### **Основная часть**

Для определения полноты сгорания ПУТ в условиях фурменных зон доменной печи №2 ЗАО «Донецксталь»-металлургический завод» (ЗАО «ДМЗ») в 2003-2005 гг. использовался петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в колошниковой пыли и шлаке, а также химический анализ доменного шлака и колошниковой пыли. Суть петрографического анализа состоит в сравнении частичек углерода кокса и ПУТ, которые имеют различную форму и размеры. Конечно, эти отличия наиболее четко проявляются в исходном состоянии, а после протекания физико-химических превращений в доменной печи указанные различия в значительной степени нивелируются.

Промышленная эксплуатация пылеугольного комплекса на ЗАО «ДМЗ» начата в сентябре 2002 г. Доменная печь № 2 полезным объемом 1033 м<sup>3</sup>, введенная в эксплуатацию после капитального ремонта I разряда в апреле 2002 г., имеет 16 воздушных фурм (d=145 мм), 2 чугунные летки, клапанный двухконусный засыпной аппарат; обеспечена нагревом дутья до 1150 °С при обогащении кислородом (26 %), подводами ПГ и ПУТ. Конструкция основной и модернизированной установки для приготовления ПУТ описана ранее [18].

Печь выплавляла передельный чугу́н из привозных агломератов и окатышей, доля последних в шихте изменялась от 35 до 65 %. С декабря 2002 г. для повышения стабильности химического состава железорудной шихты в качестве основных компонентов стали использовать окатыши ОАО “ЛебГОК” и агломерат ОАО “ЮГОК”. В качестве основного топлива использовали кокс Донецкого участка Рутченковского КХЗ.

Технический анализ угля для приготовления ПУТ показан на рис. 1.

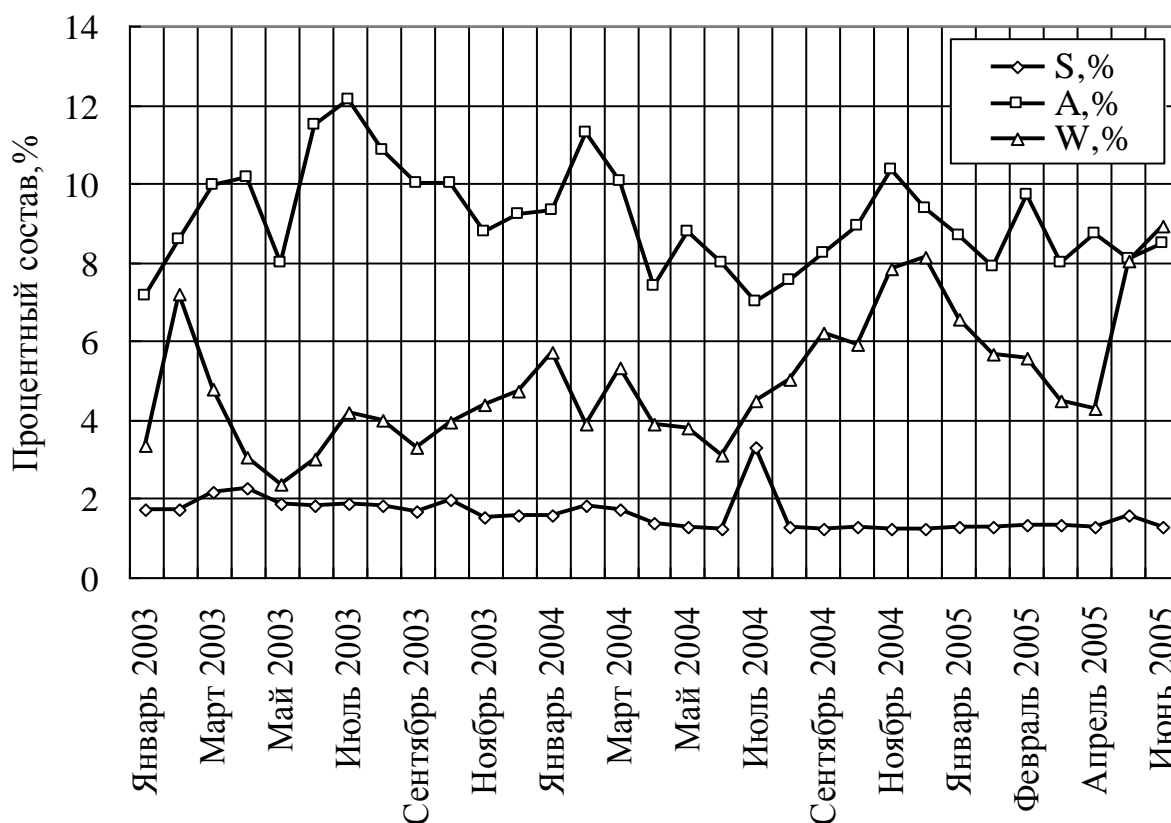


Рисунок 1 – Технический анализ угля для приготовления ПУТ

Показатели качества ПУТ характеризуются высокой тониной помола, низкой и устойчивой влажностью (рис.2). По мере освоения узла приготовления ПУТ и улучшения угольной базы, улучшился химический состав ПУТ. Средний медианный размер частиц ПУТ изменялся в пределах от 10 до 40 мкм.

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; осность и оптический знак; окраску; относительную твердость; микрохрупкость; микропластичность; магнитность; форму и размер зерен (кристаллов).

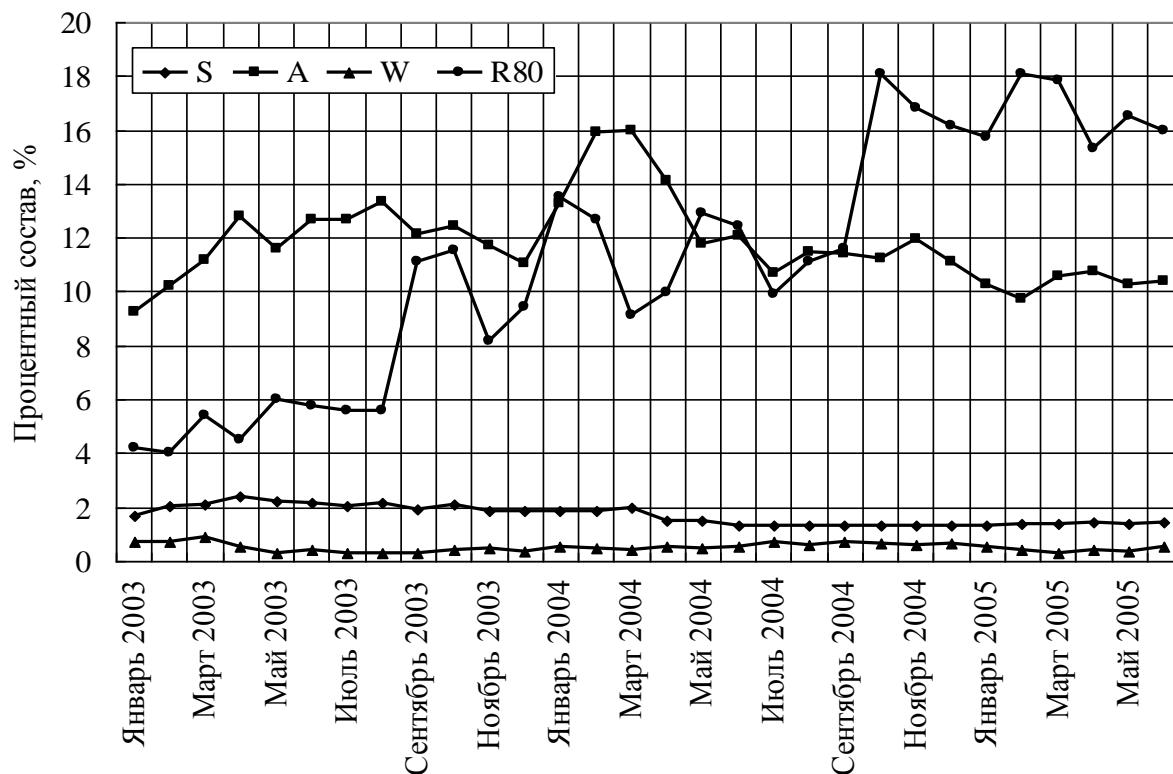


Рисунок 2 – Технический анализ и помол ПУТ

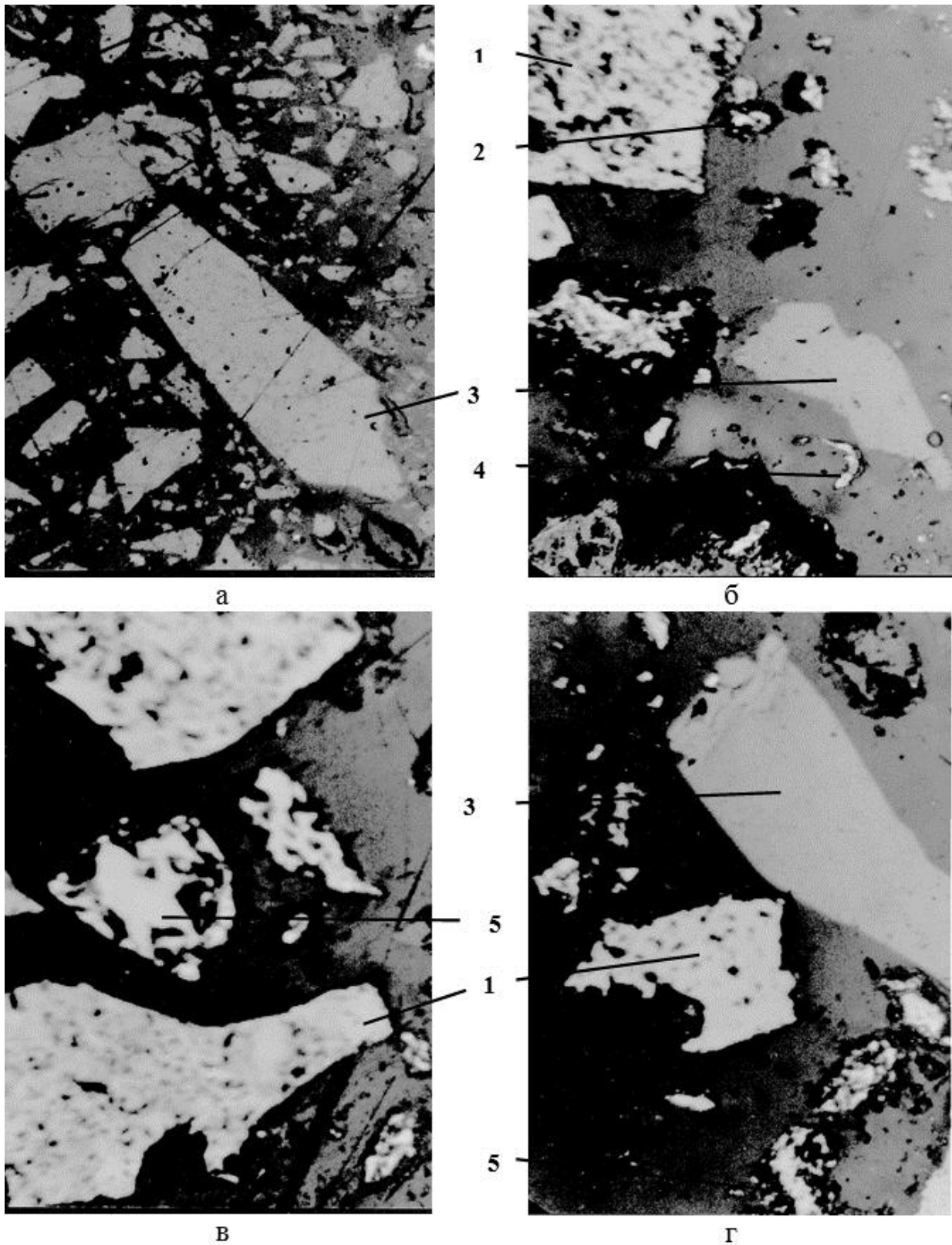
Методика исследования основывалась на определении оптических и других свойств минералов (их искусственных аналогов и некристаллических фаз), а также морфологии, структуры, степени кристалличности [19,20].

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.3.

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 доменной печи №1 (ДП-1), работающей без вдувания ПУТ и №2 (ДП-2) – с вдуванием 90-130 кг ПУТ на 1 т чугуна, приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что в колошниковой пыли преобладает кокс (до 70%) в виде частичек в десятые-сотые доли мм, в различной степени графитизированный.



а – ПУТ, б и г – колошниковая пыль ДП-2, в - колошниковая пыль ДП-1; 1 – кокс, 2 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 3 – уголь, 4 – графит, 5 –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Рисунок 3 - Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (x 537)

Таблица 1 – Основные компоненты колошниковой пыли

Компоненты	Содержание, объемн. %	
	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

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.

Динамика изменения выноса колошниковой пыли, углерода в колошниковой пыли и удельного выноса углерода с колошниковой пылью на ДП-1 и ДП-2 в августе 2003 - мае 2005г. приведена в таблице 2. Вынос углерода с колошниковой пылью определялся расчетом по данным выноса колошниковой пыли и химическому анализу в ней углерода. Вынос ко-

лошниковой пыли за время исследования изменялся в диапазоне от 73 до 194 т/т чугуна на ДП-1 и от 72 до 145 т/т чугуна на ДП-2, а химический анализ колошниковой пыли по углероду - 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.

Таблица 2 – Динамика изменения выноса колошниковой пыли, углерода в колошниковой пыли и удельного выноса углерода

Показатель	ДП-1			ДП-2		
	Вынос КП, т/т кокса	Углерод в КП, %	Вынос углерода, кг/т кокса	Вынос КП, т/т кокса	Углерод в КП, %	Вынос углерода, кг/т кокса
Август 2003	77,644	14,060	10,917	88,578	12,990	11,506
Сентябрь 2003	73,967	17,35	12,833	86,247	14,4	12,420
Октябрь 2003	94,172	19,07	17,959	78,176	7,8	5,613
Ноябрь 2003	96,662	17,98	17,923	72,040	8,01	5,77
Декабрь 2003	98,778	18,2	17,978	83,379	7,4	6,17
Январь 2004	91,924	14,37	13,210	77,254	12,87	9,943
Февраль 2004	94,046	19,07	17,935	81,722	16,23	13,263
Март 2004	93,840	16,39	15,380	89,945	15,71	14,130
Апрель 2004	94,081	21,8	20,510	84,901	21,8	18,508
Май 2004	92,801	н.д.	н.д.	100,464	н.д.	н.д.
Июнь 2004	193,568	14,7	28,455	93,013	9	8,371
Июль 2004	143,529	20,3	29,136	145,872	23,5	34,28
Август 2004	87,953	14,85	13,061	94,161	11,6	10,923
Сентябрь 2004	105,260	17,63	18,557	99,455	17,6	17,504
Октябрь 2004	73,148	н.д.	н.д.	131,082	н.д.	н.д.
Ноябрь 2004	88,592	14,35	12,711	122,905	15,7	19,298
Декабрь 2004	91,528	16,10	14,736	109,261	14,82	16,192
Январь 2005	102,816	22,4	23,031	115,88	13,89	16,2
Февраль 2005	97,723	н.д.	н.д.	128,113	н.д.	н.д.
Апрель 2005	107,204	16,93	18,15	121,315	14,77	17,918
Май 2005	н.д.	н.д.	н.д.	115,014	14,73	16,942

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. Изменение содержания углерода в шлаке представлены на рис.4.

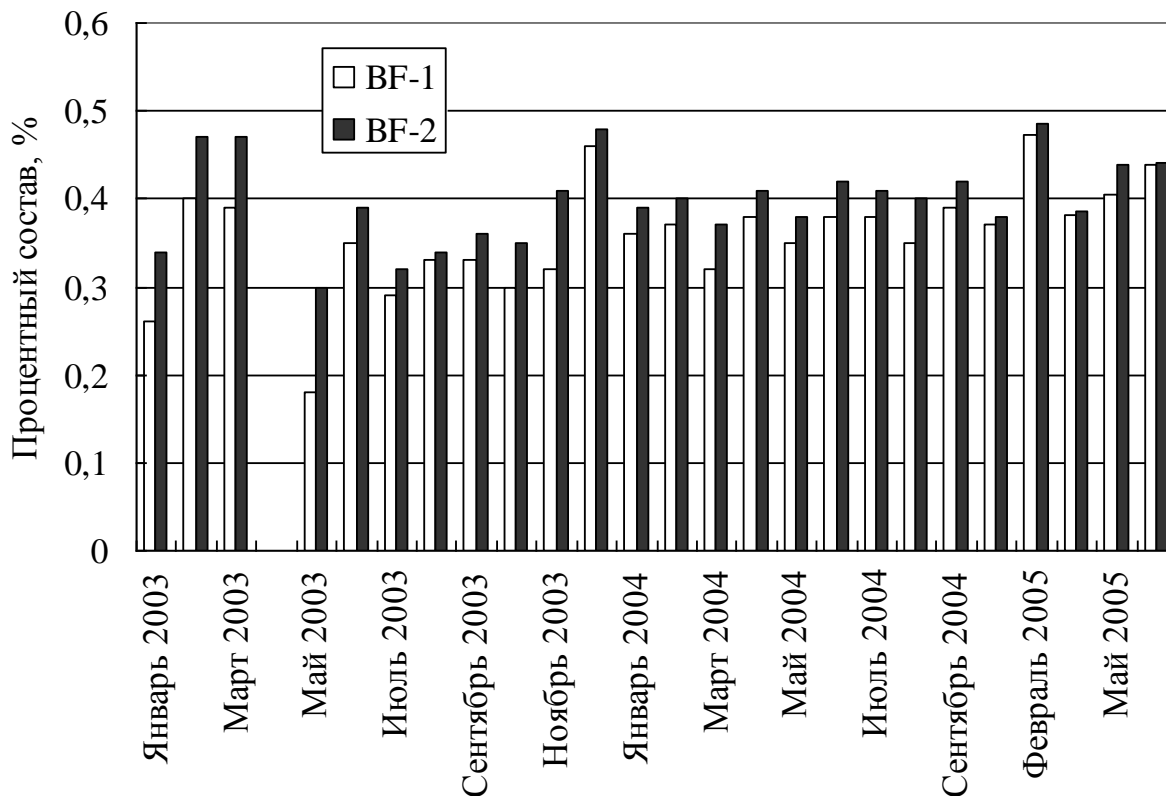


Рисунок 4 – Изменение содержания углерода в шлаке при вдувании (BF-2) и без вдувания (BF-1) ПУТ/

Из рисунка 4 видно, что по данным содержания углерода в шлаке процесс горения ПУТ в фурменных зонах не ухудшился, сохранился на достаточно высоком уровне: об этом свидетельствуют незначительный прирост содержания углерода в шлаке на 0,004-0,033 % на ДП-2.

Исследования шлака ДП-1 под микроскопом показали его раковистый излом, стеклянный блеск. Стекловидная масса имела бурый с зеленоватым оттенком цвет.

В массе стекла представлены мельчайшие (до 0,01 мм) пузырьки газа и белые волокнистые кристаллы (длиной до 1 мм), образующие пучки и крестовидные сrostки, а с поверхности корку толщиной 1-3 мм. Внешняя часть корки скрытокристаллическая, серая, с крупными порами (0,1 – 0,5 мм). Внутренняя часть прозрачна, насыщенность включениями невелика. Под микроскопом: мельчайшие капельки (1-3 мкм) металла равномерно рассеяны в массе стекла. Волокнистые кристаллы представляют собой пучки нитей толщиной около 1 мкм.

Шлак ДП-2 аналогичен шлаку ДП-1. Стекловидная масса зеленовато-бурого цвета. Блеск стеклянный, излом раковистый. От шлака ДП-1 отличается значительно большей прозрачностью за счет низкого содержания твердых и газообразных включений. Микроскопические включения металла также отличаются меньшим количеством.



Выполненные исследования содержания углерода в доменном шлаке и колошниковой пыли, а также петрографические исследования шлака и колошниковой пыли при работе доменных печей с вдуванием и без вдувания ПУТ подтвердили практическое отсутствие прироста содержания в них углерода, в частности, в виде ПУТ, что свидетельствует о высокой степени газификации углерода ПУТ в горне.

### **Выводы**

Для контроля полноты сгорания ПУТ могут быть использованы как методы непосредственного определения несгоревших частиц угля в фурменной зоне путем зондирования горна с отбором проб материалов и газов, так и косвенные методы, основанные на петрографическом и химическом анализе продуктов плавки. Анализ содержания углерода в колошниковой пыли и доменном шлаке, отобранных на доменных печах ЗАО «Донецксталь - МЗ» показал достаточно полную степень газификации частиц угля при расходах ПУТ 90 - 130 кг/т чугуна.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вегман Е.Ф. Скоростная киносъемка фурменной зоны действующей доменной печи / Е.Ф. Вегман, Ю.П.Мишин, А.Е. Пареньков // Работа фурменной зоны доменных печей. – Свердловск.- 1985. – С.3-4.
2. Zhang S. Theoretical consideration of problems relating to high coal rate injection into blast furnaces / Zhang S., Bi X. // Ironmaking and Steelmaking. - 2003. - V.30. - No.6. - P.467-474.
3. Zhang S. The Trends of Ironmaking Industry and Challenges to Chinese Blast Furnace Ironmaking in the 21st Century / S. Zhang, H.Yin // The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI 99). – Shanghai (China). - 2009. – P.2-15.
4. Helleisen M. Sondages dans l'homme mort du haut fourneau a travers une tuyere / M. Helleisen, L.Nicolle, B. Metz //Rev. met. – 1987. - 84. - №11. - P.747-758.
5. Lao D. Fundamental aspects and industrial practice of high coal injection in the blast furnace within Usinor Sacilor group/D.Lao, J.Eymond, C.Eibes, et al.// The first international congress on science and technology of ironmaking.- Sendai (Japan).- 1994.- P.517-522.
6. Sideways tuyere probe for measuring blast furnace raceway zone/ T. Kahji, T. Seyi, H. Takao, e.a.// Kawasaki Steel Nechn. Rept. – 1998. - №19. – P.123-125.
7. Kahji T. Development of Iron-Making Technologies in Japan // The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (ICSTI 99). – Shanghai (China). - 2009. – P.16-21.
8. Sahajwalla V. Investigation of combustion behavior of a PCI coal and unburnt char carryover in a US Steel blast furnace / V.Sahajwalla, C.Kong, I. Lu, et al.// 60th Ironmaking Conference Proceeding.- Baltimore (USA).- 2001.- P.451-458.
9. Langer K. Injection of pulverized coal at Thyssen Krupp Steel // Stahl and eisen. -2005. - No.11. - P.591-594.

10. Ярошевский С.Л. Изучение процесса горения дополнительного топлива в фурменных зонах доменной печи / С.Л. Ярошевский, А.Т.Анисимов // Сталь. – 1985. - №2. – С.9-13.
11. Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
12. Мухин П.Я. О поведении частицы пылеугольного топлива в горне печи / П.Я. Мухин // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. – М.: Металлургия, 1977.– С.52-54.
13. Померанцев В.В. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергия, 1986.- 312с.
14. Андронов В.Н. Расчетная оценка режима и полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи / В.Н.Андронов, В.В.Степанов, А.И. Бабич, В.В. Кочура // Технология выплавки чугуна. - М.: Металлургия, 1989.- С. 39-42.
15. Wu R. Research of utilization 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.
16. 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.
17. 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. 3ю - P. 390–395.
18. Технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом / А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский, Б.П.Крикунов и др. // Сталь.- 2005 . – №12. – С. 3-6.
19. Перепелицин В.А. Основы технической минералогии и петрографии / В.А. Перепелицин. – М.: Недра, 1987.- 255с.
20. Юшко С.А. Методы лабораторного исследования руд / С.А. Юшко. - М.: Недра, 1984.-389с.

Поступила в редакцию 02.07.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Н. Смирнов

© Кочура В.В., Ярошевский С.Л., Купенко В.И.,  
Попов В.Е., Иванов С.А., 2010

**УДК 669.162**

**А.М. Новохатский, Г.Д. Михайлюк, А.В. Карпов**

### **ПРИМЕНЕНИЕ АНТРАЦИТА В КАЧЕСТВЕ ЗАМЕНИТЕЛЯ КОКСА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Проанализированы результаты промышленного использования угля как заменителя кокса. Определены горячая и холодная прочностные характеристики антрацита. Представлены рекомендации к выбору поставщиков для применения антрацита в качестве заменителя кокса в доменном производстве.

Ключевые слова: антрацит, кокс, промышленный опыт замены кокса, механическая прочность