

# ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 669.162.2:622.788.3

Ю. В. Филатов, А. В. Емченко, В. Е. Попов, А. И. Дрейко, С. Л. Ярошевский\*, Т. А. Ивлева\*

ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод», Донецк

\*Донецкий национальный технический университет, Донецк

## Совершенствование и повышение эффективности доменной технологии на основе применения пылеугольного топлива (ПУТ)

Комплексное улучшение технологических условий плавки на основе принципа полной и комплексной компенсации, включающее применение низкосернистого пылеугольного топлива (ПУТ), кокса «Премиум», замену агломерата окатышами и другое, позволило полностью отказаться от применения природного газа и снизить расход кокса до 400-450 кг/т чугуна при сохранении или повышении производительности печей и качества чугуна.

**Ключевые слова:** доменная печь, ПУТ, окатыши, кокс «Премиум»

Многолетний опыт Донецкого металлургического завода показал, что современная доменная технология не может развиваться при использовании в шихте привозного агломерата, содержащего 18-25 % мелочи размером 0-5 мм и 53-55 % железа, прежде всего из-за нарушения газодинамических условий плавки [1].

Только комплексное улучшение технологических условий плавки на основе принципа полной и комплексной компенсации, включающее замену агломерата окатышами, и применение кокса «Премиум», низкосернистого ПУТ и других, позволили полностью отказаться от использования ПГ и снизить расход кокса до 400-450 кг/т чугуна при сохранении или повышении производительности печей и качества чугуна [1-3]\*. Опыт ДМЗ строго обоснован теоретически, что подтверждается успешной зарубежной практикой: в настоящее время десятки современных доменных цехов, не имеющих «своего» агломерата, работают на окатышах с применением ПГ, ПУТ, мазута и другого топлива; при этом уровень основных ТЭП плавки близок к уровню, достигнутому лучшими доменными цехами, работающими на агломерате [4-6].

### Шихтовые условия плавки, совершенствование и оптимизация технологии

С 2006 г. в доменном цехе ПрАО «Донецксталь» – МЗ» начали регулярно и успешно использовать кокс «Премиум», производство которого освоено на Ясиновском, Донецком и Макеевском КХЗ, а также пылеугольное топливо со значи-

тельными (до 60 %) добавками низкосернистого газового угля шахты «Заречная» на Кузбассе в России (табл. 1, 2).

За время освоения (с 2003 г.) современной ПУТ-технологии из шихты ДП № 1 и 2 полностью выведен привозной агломерат, замененный окатышами СевГОК (табл. 3).

Основными компенсирующими мероприятиями, обеспечившими успешную работу ДП № 2 при вдувании ПУТ, стали:

– применение кокса улучшенного качества («Премиум»);

Таблица 1

Показатели качества кокса «Премиум» ЯКХЗ

Показатели	Январь–март 2011 г.			
	среднеарифметическое значение	минимальное	максимальное	среднеквадратичное отклонение
Содержание, %:				
– влаги	4,28	1,60	7,50	1,680
– золы	10,39	9,80	11,10	0,213
– серы	0,70	0,64	0,90	0,047
– летучих	0,79	0,70	6,90	0,049
– M25	88,13	86,20	88,80	0,292
– M10	7,36	6,80	7,60	0,132
– CRI	29,48	25,20	42,90	3,040
– CRS	55,11	43,40	61,60	2,681
Ситовый состав:				
– >80	9,45	1,40	13,90	3,145
– 0,25	2,80	2,00	4,05	0,438

Таблица 2

Показатели качества ПУТ (соотношение марок углей Т и Г – 40/60)

Показатели	Октябрь 2010 г. – март 2011 г.			
	среднеарифметическое значение	минимальное	максимальное	среднеквадратичное отклонение
Содержание, %:				
– золы	9,96	7,00	12,10	1,17
– серы	0,87	0,30	1,20	0,10
– летучих	30,97	28,60	37,70	1,37

\*В работе принимали участие сотрудники ПрАО «Донецксталь» – МЗ» – Ивлева В. П., Иванов С. А., Горин Д. В., Брага В. В., Храпко А. В., мастера и газовщики ДП № 2; и ДонНТУ – Хлапонин Н. С., Афанасьева З. К., Кузин А. В., Мишин И. В.

– современная подготовка кокса к плавке с высевом и использованием в смеси с окатышами коксового орешка;

– исключение из шихты бедных марганецсодержащих добавок;

– повышение содержания кислорода в дутье;

– исключение из состава дутья ПГ;

– замена привозных агломератов окатышами СевГОК;

– уменьшение выхода шлака на 124 кг/т чугуна (26,4 %);

– сокращение прихода серы с шихтой на 2,09 кг/т чугуна;

– снижение основности шлака (CaO/SiO<sub>2</sub>) от 1,26 до 1,17 единицы и повышение содержания в нем MgO до 6-7 %;

– улучшение качества ПУТ по содержанию золы (до 10,0 % и менее) и серы (до 0,8 % и менее);

– оптимизация технологического процесса на основании статистического исследования первичных данных (табл. 4) [6, 7].

Освоение современной пылеугольной технологии проведено на доменной печи № 2 (полезным объемом 1033 м<sup>3</sup>, с 2 чугунами летками и 16 воздушными фурмами), введенной в эксплуатацию в 2002 г. после капитального ремонта I разряда.

#### Анализ работы ДП-2 в период исследования

Реализация комплекса компенсирующих мероприятий и вдувание на 1 т чугуна 162 кг ПУТ обеспечили вывод из состава дутья 88,5 м<sup>3</sup>/т ПГ, снижение расхода кокса на 108 кг/т (20,5 %), условного топлива – на 29,53 (4,7 %), прирост суточной производительности печи – на 220,7 (11,97 %). Сравнение показателей в табл. 4.

О благоприятном изменении технологического процесса при этом свидетельствуют снижение выхода горновых газов на 270 м<sup>3</sup>/т чугуна (13,9 %), повышение степени использования их восстановительной энергии ( $\eta_{\text{CO}}$ ) на 12,8 % (5,15 % относительных), теоретической температуры горения ( $T_T$ ) на 73 °С, а также минимальные изменения определяющих показателей и наличие существенного резерва между их предельными и фактическими значениями (табл. 4) [6].

#### Показатели качества окатышей СевГОК

Показатели	Октябрь 2010 г. – февраль 2011 г.			
	среднеарифметическое значение	минимальное	максимальное	среднеквадратичное отклонение
Содержание, %:				
– Fe	61,000	60,08	62,25	0,404
– SiO <sub>2</sub>	7,160	6,19	8,05	0,339
– CaO	4,173	3,54	4,86	0,233
– MgO	1,241	0,72	1,53	0,104
Основность, едн.	0,758	0,65	0,85	0,0296
Прочность на раздавливание, кг	235,000	85,00	486,00	70,000

Таблица 4

#### Показатели работы доменной печи № 2 ПрАО «Донецксталь» – МЗ»

Показатели	Численные значения показателей по доменным печам и периодам	
	ДП № 2	
	июнь-август 2002 г.	декабрь 2010 г.
Производство среднесуточное, т/сутки	1844,30	2065,00
Расход кокса сухого скипового и коксового орешка, кг/т чугуна	527,00	419,00
Расход коксового орешка, кг/т чугуна	–	14,00
Расход материалов, кг/т чугуна:		
– агломерата	944,00	–
– окатышей	817,00	1571,00
– известняка обыкновенного	154,00	152,00
Дутьевой режим:		
– давление, ати	2,30	2,20
– содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	23,00	25,00
– температура, °С	1039,00	947,00
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	88,50	–
Расход ПУТ, кг/т чугуна	–	162,00
Колошниковый газ:		
– давление, ати	1,20	1,27
– температура, °С	236,00	179,00
Химический состав, %:		
– CO	25,10	25,31
– CO <sub>2</sub>	16,87	21,00
– H <sub>2</sub>	5,70	3,32
Химический состав чугуна, %:		
– Si	0,81	0,65
– S	0,03	0,03
Шлаковый режим:		
– выход, кг/т чугуна	470,00	346,00
– химический состав, %:		
– Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,78	6,24
– MgO	4,30	7,00
– основность шлака, (CaO + MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,37	1,36
Теоретическая температура горения, °С	2004,00	2077,00
Степень прямого восстановления, $r_{\text{пр}}$ , %	39,57	37,54
Степень использования газа, $\eta_{\text{CO}}$ , %	40,20	45,35
Определяющие показатели:		
– выход шлака, кг/т кокса	891,00	799,00
– выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /т кокса	3950,00	4318,00
– скорость газа в распаре, м/с	13,01	10,64

Таким образом, освоение технологии выполнено в режиме полной и комплексной компенсации, что свидетельствует о принципиальной возможности дальнейшего эффективного повышения расхода ПУТ.

### Оптимизация технологии доменной плавки

Методика оптимизации технологии доменной плавки путем статистического исследования первичных данных описана ранее [9].

В период исследования (01.11.2010 – 31.03.2011) доменная печь работала на окатышах, коксе «Премиум», с вдуванием ПУТ (150-160 кг на 1 т чугуна), приготовленного из смеси тощего (40 %) и газового углей, без вдувания ПГ (табл. 4).

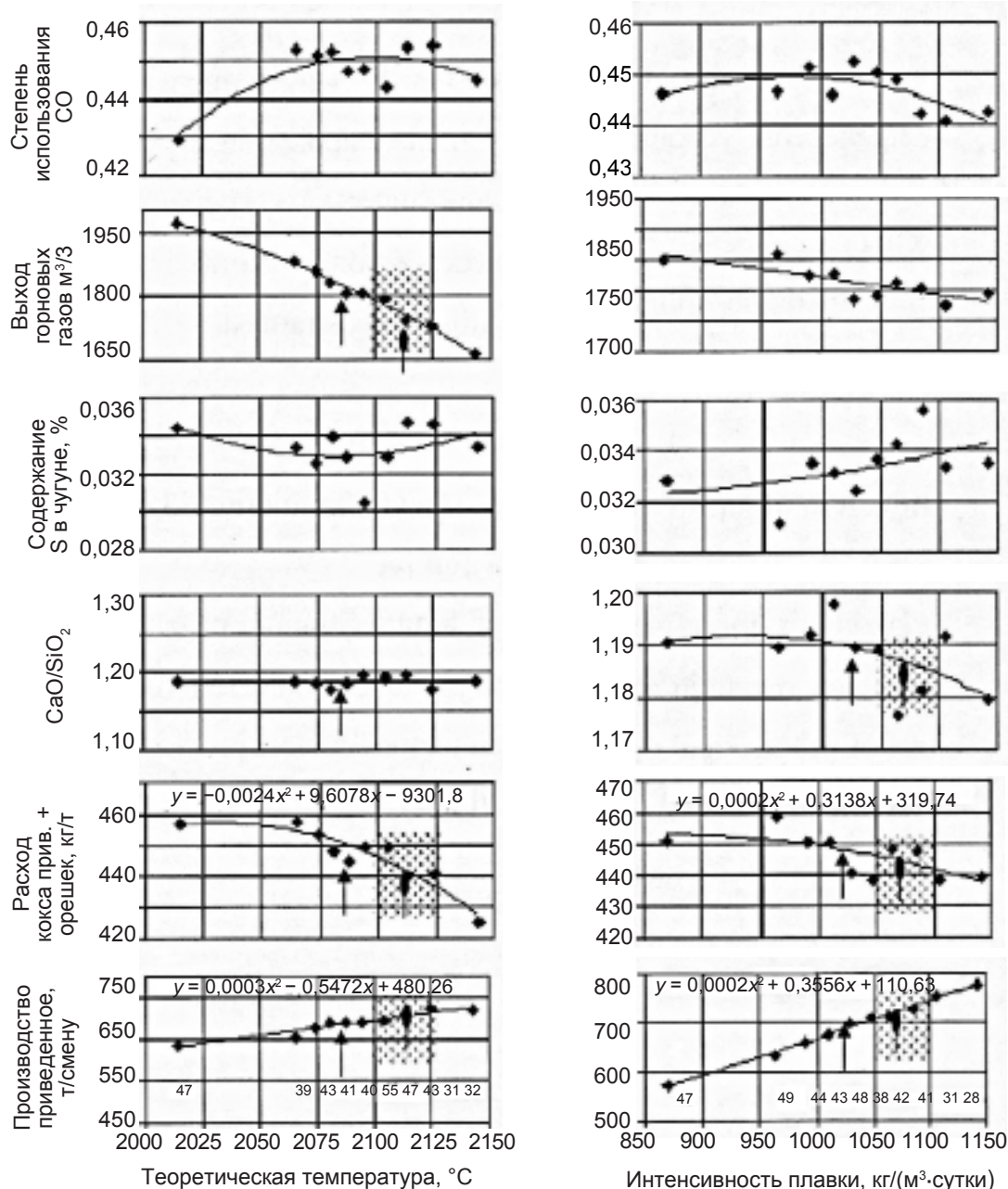
Из рис. 1 следует, что оптимальный уровень теоретической температуры горения ( $T_T$ ) и интенсивности плавки (по углероду), равные соответственно

2100-2125 °С и 1050-1100 кг/(м<sup>3</sup>·сутки), превышают на 25 °С и 50 кг/(м<sup>3</sup>·сутки) соответственно их фактические значения, что определяет перерасход кокса 8-10 кг/т, повышение себестоимости чугуна, снижение производительности печи.

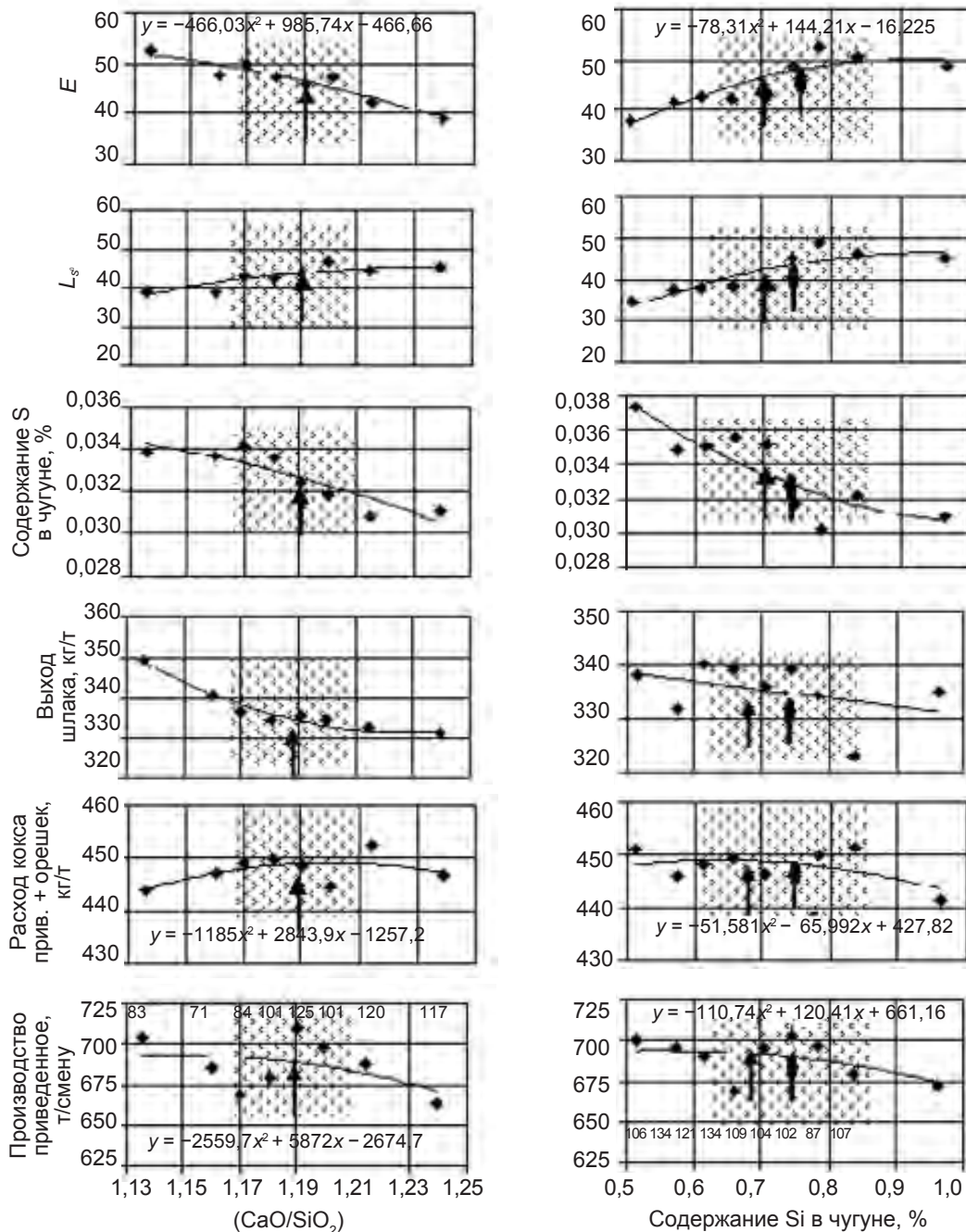
Повышение уровня  $T_T$  (50-70 °С) по сравнению с работой ДП с вдуванием ПГ вполне закономерно и является необходимым компенсирующим фактором, обеспечивающим интенсификацию газификации ПУТ в печи.

Оптимальные значения основности шлака ( $CaO/SiO_2$ ) и содержания [Si] в чугуне, равные соответственно 1,17-1,21 и 0,65-0,85 %, по основности совпадают с фактическими, а по содержанию кремния превышают их на 0,05 % (рис. 2).

Оптимальный уровень указанных параметров определяют, прежде всего исходя из необходимости



**Рис. 1.** Зависимость показателей доменной плавки от теоретической температуры горения и интенсивности плавки (приведение по всем факторам); ПраО «Донецксталь» – МЗ; 418 опытов; 01.11.10 – 10.31.03.11 гг. ↑ – среднее значение показателя, ♣ – диапазон рекомендуемого оптимального параметра плавки; (47, 39, 43 и т. д.) – число опытов-смен



**Рис. 2.** Зависимость показателей доменной плавки от основности шлака  $CaO/SiO_2$  (1,16-1,20, 1004 опытов) (приведение по всем факторам) и содержания Si (0,65-0,85 %, 802 опыта) в чугуне (приведение без кремния); «Донецксталь» – МЗ», ДП № 2; 01.11.10 – 31.03.11; ↑ – среднее значение показателя, ♣ – диапазон рекомендуемого оптимального параметра плавки; 71, 83...134 – число опытов-смен работы печи

поддержания кондиционного уровня содержания серы в чугуне, но, естественно, с учетом их влияния на основные ТЭП плавки.

Повышение содержания [Si] в чугуне предопределяется также пониженной температурой чугуна на выпуске – 1450 °С, что негативно влияет на процесс десульфурации и другие определяющие показатели плавки (см. табл. 4).

Статистические исследования показали, что в сложившихся на «Донецксталь» – МЗ» технологических условиях существенными резервами работы доменных печей и эффективными компенсирующими факторами являются снижение на 1 т чугуна выхода шлака и расхода известняка (табл. 5). Суммарный для условий «Донецксталь» – МЗ» потенци-

альный резерв по снижению расхода кокса от принципиально возможных снижения выхода шлака до 300 кг/т и вывода из шихты сырого известняка (150 кг/т) составляет 10-20 %.

Расчеты показывают, что шихта из окатышей и кокс «Премиум» в сочетании с современной его подготовкой к плавке и применением коксового орешка, повышение (1100 °С) температуры дутья, оптимизация технологии и прочее создают резерв для эффективного повышения расхода ПУТ до 200 кг/т чугуна и выше, дальнейшего снижения расхода кокса и простота производительности печи (см. табл. 4).

Разработана и осуществляется программа по реализации данного режима на одной из печей завода 2011 г.

Изменение расхода кокса и производительности печи № 2 от расхода известняка и выхода шлака на ПрАО «Донецксталь» – МЗ» (10 февраля – 3 марта 2011 г.)

Показатели, кг/т	Количество опытов	Среднее значение	min	max	Изменение $Q_k$ при колебаниях значений $Q_{\text{известн}}$ и $Q_{\text{шлак}} \pm 10$ кг/т; %	Изменение производительности при колебаниях значений $Q_{\text{известн}}$ и $Q_{\text{шлак}} \pm 10$ кг/т; %
$Q_{\text{известн}}$	63	150	130	170	0,73	1,31
$Q_{\text{шлак}}$	111	320	300	340	0,83	0,48

### Выводы

1. Комплексное улучшение технологических условий плавки на основе принципа полной и комплексной компенсации, включающее замену агломерата окатышами, и применение кокса «Премиум», низкосернистого ПУТ и другое, позволили повысить расход ПУТ до 162 кг/т, отказаться от применения ПГ и снизить расход кокса на 108 кг/т чугуна (20,1 %) при улучшении производительности печи на 11,9 % и сохранении качества чугуна на базовом уровне.

2. Основными компенсирующими мероприятиями, обеспечившими успешную работу ДП № 2 при вдувании ПУТ, стали:

- применение кокса улучшенного качества («Премиум»);
- современная подготовка кокса к плавке с высе-

вом и использованием в смеси с окатышами коксового орешка;

- повышение содержания кислорода в дутье;
- исключение из состава дутья ПГ;
- замена привозных агломератов окатышами СевГОК;
- улучшение качества ПУТ по содержанию золы (до 10,0 % и менее) и серы (до 0,8 % и менее).

3. Теоретические соображения, отечественный и зарубежный опыт показывают, что применение ПУТ на основе принципа полной и комплексной компенсации создает предпосылки для значительного дальнейшего снижения себестоимости чугуна (прежде всего, за счет снижения расхода кокса до 250 кг/т чугуна и ниже) и роста производительности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевский С. Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Metallurgy, 1988. – 176 с.
2. Пылеугольное топливо – безальтернативная перспектива доменного производства в Украине / А. Н. Рыженков, А. А. Минаев, С. Л. Ярошевский и др. // Сталь. – 2010. – № 10. – С. 7-13.
3. Эффективность и перспективы пылеугольной технологии выплавки чугуна в ЗАО «Донецксталь» – металлургический завод» / С. Л. Ярошевский, А. В. Емченко, В. Е. Попов и др. // Чер. металлургия. – 2010. – № 5. – С. 37-45.
4. Работа доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / А. А. Минаев, С. Л. Ярошевский, В. И. Бирючев и др. // Металлург. – 1998. – № 10. – С. 23-27.
5. Современный уровень доменной технологии» / С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко, А. И. Бабич и др. // Металл и литье Украины. – 2006. – № 6. – С. 14-19.
6. Ярошевский С. Л. Перспективы и эффективность доменной технологии определяются степенью замены кокса пылеугольным топливом / Доклад на конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна». – Донецк, 2007. – 21 с.
7. Исследование и оптимизация технологии доменной плавки / Л. Ф. Литвинов, С. Л. Ярошевский, А. М. Кузнецов и др. // Металл и литье Украины. – 2003. – № 11-12. – С. 7-10.

### Анотація

Філатов Ю. В., Емченко А. В., Попов В. Є., Дрейко О. І., Ярошевський С. Л., Івлєва Т. О.

Вдосконалення і підвищення ефективності доменної технології на основі застосування пиловугільного палива (ПВП)

Комплексне поліпшення технологічних умов плавки на основі принципу повної і комплексної компенсації, що включає застосування низькосірчастого ПВП, коксу «Премиум», заміну агломерату окатками тощо, дозволило повністю відмовитися від застосування природного газу (ПГ) і понизити витрату коксу до 400-450 кг/т чавуну при збереженні або поліпшенні продуктивності печей і якості чавуну.

### Ключові слова

доменна піч, ПВП, окатки, кокс «Премиум»

The complex improvement of technological conditions of blast-furnace smelting on basis of principle of full and complex compensation, which includes usage of low-sulphur pulverized coal, coke «Premium», the change of sinter with pellets, allowed to reject the usage of natural gas and to reduce the coke consumption to 400-450 kg/thm with saving or improvement of furnace productivity and iron quality.

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 (ПУТ), вдуваемого в горн доменных печей, на основании петрографического анализа продуктов доменной плавки.

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

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

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].

Исследование полноты сгорания ПУТ, проведенное с использованием петрографического анализа продуктов плавки на мощных (более 4000 м<sup>3</sup>) доменных печах комбината Баостил (Китай), показывает неполноту сгорания ПУТ 1,1 и 2,6 % при вдувании в горн 178 и 240 кг ПУТ на 1 т чугуна: при этом степень замены кокса ПУТ составляла около 40 %, на 1 т чугуна расходовалось менее 300 кг кокса, неполнота сгорания увеличивалась до 2,6 % при вдувании ПУТ 240 кг/т чугуна и еще не препятствовала 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 степени сгорания ПУТ на доменной печи № 1 (ДП-1) доменного цеха «Донецксталь» – МЗ в мае 2010 г. использовали петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в продуктах доменной плавки – колошниковой пыли, шламе и шлаке.

Суть метода подробно изложена в работе [4] 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 эффективно работала на окатышах СевГОК (1557 кг/т чугуна): производительность печи составляла 2000 т/сутки, расход (в кг/т чугуна) кокса «Премиум» – 422; ПУТ – 135, железоблюса – 64, известняка – 147.

Во время эксперимента вдували ПУТ из смеси газового и тощего угля в соотношении 3/2. Качество ПУТ характеризуется высокой тониной помола, стабильным техническим анализом (в %: А = 10,35, S = 0,99, W = 1,58, ЛВ = 30). Средний медианный размер частиц ПУТ (в мкм) составлял 35: >80 – 13,77 %; 63-80 – 8,9 %; 0-63 – 77,83 %).