

УДК 669.162:669.162.16(477)

**А.В. Кузин, С.Л. Ярошевский, А.М. Кузнецов,
Н.С. Хлапонин, З.К. Афанасьева**

**ПОДГОТОВКА КОКСА К ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ НА СОВРЕМЕННОМ
ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В УКРАИНЕ**

*Донецкий национальный технический университет
ОАО «Енакиевский металлургический завод»*

Рассмотрено влияние дробящих нагрузок на фракционный состав кокса до и после загрузки его в доменную печь. Определены комплексные показатели качества скипового кокса. Показано, что наименьшее значение перепада давления газа и максимальные однородность и порозность кокса достигаются при содержании суммы классов 40–60 и 60–80 мм выше 95%.

Черная металлургия является одной из наиболее энергоёмких отраслей промышленности Украины: так, например, расход условного топлива на 1 т готового проката достигает 1200 кг и более, причем доля топлива, расходуемого на получение 1 т чугуна, превышает 50%. Поэтому одной из основных задач, стоящей перед доменщиками, является снижение расхода условного топлива на 1 т чугуна и в первую очередь основного вида топлива – кокса. Расход кокса на 1 т чугуна является важнейшим и определяющим показателем эффективности доменной технологии, поскольку кокс является самым дорогостоящим компонентом доменной шихты и доля его в себестоимости чугуна достигает 30%.

В настоящее время удельный расход скипового кокса в среднем для Украины составляет около 500 кг/т чугуна, что в 1,5–2 раза выше его расхода в доменных печах за рубежом. Наравне с качеством железорудного сырья, дутьевого режима, применением дополнительных видов топлива, указанное различие в значительной мере определяется также качеством кокса и его подготовкой к доменной плавке. [1].

Все доменные печи в Украине работают с применением природного газа (ПГ), что обеспечивает снижение расхода кокса на 10–15%. Эффективность данной технологии, однако, значительно снизилась из-за дефицитности и высокой стоимости ПГ.

Альтернативой технологии доменной плавки с вдуванием в горн доменных печей ПГ в сложившихся экономических условиях является технология с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ). Это определяется наличием запасов неспекающихся углей, пригодных для приготовления из них ПУТ, возможностью замены ПУТ природного газа и до 40–50% кокса [2].

Однако вдувание ПУТ в условиях Украины без соответствующего изменения технологии доменной плавки не позволит повысить его расход более 100 кг/т чугуна. Для эффективного использования ПУТ-технологии

необходимо внедрение компенсирующих мероприятий, направленных на улучшение качества шихтовых материалов, шлакового и температурно-дутьевого режимов и т.д. В первую очередь это относится к повышению качества кокса.

Известно, что еще до загрузки в доменную печь кокс претерпевает значительные изменения фракционного состава при транспортировке его от коксохимического завода до бункерной эстакады доменного цеха. Проведенные ранее исследования на Череповецком [3, 4], Карагандинском [5] и Нижнетагильском [6] металлургических предприятиях показали, что разрушение кокса всех классов в наибольшей степени происходит на начальном этапе транспортировки (табл. 1).

Таблица 1. Динамика изменения фракционного состава кокса при транспортировке (по данным [3–6])

Место отбора кокса	Гранулометрический состав, %						Прочность кокса		Ссылка
	+80	80–60	60–40	40–25	<25	<10	M ₂₅	M ₁₀	
После коксо-сортировки КХЗ	13,6	51,5	25,7	7,8	1,4	0,7	88,6	7,6	[3]
Перед скипом	1,2	27,7	47,3	22,2	1,6	0,6	90,5	6,2	
После коксо-сортировки КХЗ	13,8	62,1	21,2	2,0	0,9	нд	88,6	7,8	[4]
Перед скипом	1,3	29,5	42,6	21,7	4,9	нд	89,1	6,9	
После коксо-сортировки КХЗ	6,0	38,4	42,4	10,4	2,8	нд	84,8	7,9	[5]
Перед скипом	2,4	33,2	50,8	11,8	1,8	нд	88,5	7,5	
До коксо-сортировки КХЗ	30,6	27,3	29,0	8,8	4,3	нд	84,6	9,6	[6]
Перед скипом	1,6	17,3	56,4	23,8	0,9	нд	87,8	7,0	

Из табл. 1, видно, что наибольшему разрушению подвержен кокс крупностью более 80 и 80–60 мм, что определяет повышение доли классов 60–40 и 40–25 мм.

Ещё большим нагрузкам кокс подвергается в доменной печи. В зонах когезии и первичного шлакообразования доменной печи кокс предопределяет сохранение газопроницаемости и дренажной способности этих зон. При вдувании больших количеств ПУТ роль кокса – разрыхлителя – значительно возрастает вследствие снижения его объемной доли в шихте с 50–60 до 35–40%. Вследствие этого происходит повышение механической, термической и химической нагрузок на кокс. Это определяется увеличением рудных нагрузок с 2,5–3,5 до 5–6 единиц на 1 т кокса, времени пребывания материалов в печи с 6–8 до 9–10 часов, пропорционально времени пребывания кокса в печи возрастают количество проходящих через

через него чугуна, шлака, горновых газов, диоксида углерода, щелочей и т.д.

По мере плавления шихтовых материалов в доменной печи кокс также претерпевает значительные изменения. Проведенные ранее исследования показали, что кокс изменяется не только по высоте, но и по сечению доменной печи. Показано, что реакционная способность кокса в нижней части шахты доменной печи возрастает практически вдвое по сравнению с загружаемым коксом [7, 8].

Проведенные на ряде металлургических предприятий исследования показали значительное повышение содержания мелких фракций в фурменном коксе: так, содержание фракции –25 мм увеличивается в фурменном коксе до 21–46,1% против 0–3,3% в скиповом (табл.2) [9–11].

Таблица 2. Динамика изменения фракционного состава кокса в доменной печи (по данным [9–11])

Место отбора	Содержание класса,%								Ссылка
	+80	80–60	60–40	40–25	25–10	10–5	5–0	<25	
Скиповый кокс	5,5	27,6	44,3	19,3	–	–	–	3,3	[9]
Фурменный кокс	0,0	9,8	37,1	32,1	–	–	–	21,0	
Скиповый кокс	16,7	31,2	44,1	8,0	нд	нд	нд	нд	[10]
Фурменный кокс	–	3,3	19,2	31,4	24,4	8,0	13,7	46,1	
Скиповый кокс ¹	15,7	34,0	37,4	10,5	0,9	0,8	0,7	2,4	[11]
Фурменный кокс ²	0,8	14,7	40,0	29,6	3,7 ³	2,8 ⁴	8,4	14,9	
Примечания: 1 – среднее по 4 пробам; 2 – среднее по 3 пробам; 3 – фракция 25–15 мм; 4 – фракция 15–5 мм.									

В настоящее время за рубежом качество кокса, помимо фракционного состава, характеризуется показателями горячей прочности (CSR) и реакционной способности (CRI). Авторы работ [12, 13] отмечают, что повышение показателя CSR более 60% позволяет стабильно поддерживать расход ддуваемого ПУТ выше 150–180 кг/т чугуна.

Таким образом, улучшение качества и современная подготовка кокса к доменной плавке, наряду с мероприятиями по улучшению качества железорудной шихты и параметров дутьевого режима, обеспечили качественный рост показателей доменной плавки: повышение расхода ПУТ до 150–250 кг/т чугуна, снижение расхода кокса до 250–350 кг/т чугуна при сохранении или повышении производительности доменных печей до 2,5–3,5 т/(м³·сутки) [14–16].

К сожалению, принятая более полувека назад в Украине схема подготовки кокса к доменной плавке, заключающаяся в высеве из кокса фракции 25 мм и менее, не соответствует требованиям современной доменной технологии.

В настоящее время в полном соответствии с современным техническим уровнем в мире общепринята схема подготовки кокса, включающая высев из металлургического кокса мелочи менее 32–40 мм, высев и дробление фракции более 80 мм, высев из отсева коксового орешка фракцией от 5–15 до 32–40 мм с последующей его загрузкой в печь в смеси с железорудной шихтой.

Данная схема подготовки кокса решает ряд задач:

- отсев из металлургического кокса фракции менее 40 мм, а также более 80 мм с последующим её дроблением, способствует улучшению однородности фракционного состава всей массы загружаемого скипового кокса, повышению среднего размера куска, порозности и газопроницаемости коксовой насадки;
- выделение из отсева кокса коксового орешка с последующей его загрузкой в рудную часть определяет повышение газопроницаемости как «сухой» зоны, так и зоны когезии доменной печи, соответственное увеличение количества проходящих через указанные зоны газов;
- определяет снижение потерь кокса в виде фракции –10 мм по сравнению с традиционной технологией.

Предлагаемая схема подготовки кокса в доменном производстве создает условия для более рационального его применения, увеличения газопроницаемости столба шихты и повышения эффективности использования восстановительного потенциала газа и, соответственно, повышения оптимального расхода и эффективности применения дополнительных видов топлива.

Для гранулометрического состава скипового кокса важнейшее значение имеют минимальный и максимальный размеры кусков кокса, поскольку они в решающей мере определяют замусоренность коксовой насадки и ее газопроницаемость. Так, на Череповецком металлургическом комбинате при снижении эффективности работы коксовых грохотов содержание класса 40–25 мм в скиповом коксе возрастало до 25%, что существенно осложняло работу доменной печи объемом 2700 м³ [17].

На нескольких металлургических заводах ФРГ на доменных печах различного объема были проведены опытные плавки с использованием кокса различной крупности. Так, при увеличении доли в скиповом коксе класса 40–80 мм с 59% до 93% достигнуто существенное улучшение показателей доменной плавки: производительность доменных печей возросла на 4,4–19,3% при снижении удельного расхода кокса [18–20].

Опытными плавками на заводе в Бхилаи (Индия) показано, что при снижении класса +80 мм в скиповом коксе на каждый 1% удельный расход последнего снижается на 0,859%, а производительность возрастает на 0,788% [21].

Таким образом, на современном уровне подготовки кокса к доменной плавке при выделении из отсева кокса коксового орешка и использовании его в доменной плавке минимальный размер кусков скипового кокса целе-

сообразно поддерживать на уровне 32–40 мм, при этом количество фракции +80 мм должно быть минимальным.

Для расчета комплексных показателей кокса в качестве базового (вариант 1) принят фракционный состав металлургического кокса Авдеевского КХЗ. Фракционный состав коксов (варианты 2–7) рассчитаны исходя из условия повышения суммы фракций 40–60 и 60–80 мм от 75 до 97% и пропорционального уменьшения фракций –25, 25–40 и +80 мм (табл.3).

Таблица 3. Исходные данные для расчета определяющих показателей качества кокса

№	Фракция кокса, %					Содержание фракции 40–80 мм, %
	<25	25–40	40–60	60–80	+80	
1	3,6	13,7	42,6	27,3	12,8	69,9
2	3,0	11,3	45,7	29,3	10,7	75,0
3	2,4	9,1	48,8	31,2	8,5	80,0
4	1,8	6,8	51,8	33,2	6,4	85,0
5	1,2	4,5	54,9	35,1	4,3	90,0
6	0,6	2,3	57,9	37,1	2,1	95,0
7	0,4	1,3	59,1	37,9	1,3	97,0

Перепад давления газа рассчитывали по известному уравнению Дарси–Вейсбаха

$$\Delta P = f \cdot \frac{H \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{\text{гарм}} \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{\Phi_1} \text{ Па} \quad (1)$$

где f – коэффициент сопротивления; H – высота слоя, м; ε – порозность, доли единицы; ρ – действительная плотность газа, кг/м³; w – действительная скорость газа, м/с; $d_{\text{гарм}}$ – среднегармонический размер частиц, м; Φ_1 – фактор формы куска кокса.

В качестве исходных использовали следующие данные:

1) коэффициент f определяли исходя из критерия Рейнольдса по формуле

$$f = 1,75 + \frac{150}{Re} \quad (2)$$

2) определили слой кокса и путь H , пройденный газом через коксовую линзу в зоне когезии. Величина H определяется исходя из насыпного веса кокса, массой кокса в подаче, углом наклона коксовой линзы в зоне когезии по отношению к горизонту (примерно 15°), системой загрузки.

3) порозность слоя кокса рассчитывали по формуле Томаша А.А. [22]

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon^o - g \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - \varepsilon^o}{\varepsilon^o \cdot \Phi_{2/3}^o} \right) \cdot \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \right]}{1 - g \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - \varepsilon^o}{\varepsilon^o \cdot \Phi_{2/3}^o} \right) \cdot \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \right]}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3)$$

где g – содержание мелкой фракции материала, доли единицы; ε^o – порозность кокса, не содержащего мелких частиц, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\Phi_{2/3}^o$ – фактор формы для шаров, равный 0,52; d_m, d_k – мелкая и крупная фракция кокса.

4) скорость газа определяли по формуле

$$w = Q \cdot \left(1 - \text{РН} \frac{\gamma_k}{\gamma_a} \right) / S \quad (4)$$

где Q – среднее значение количества газа, проходящее через зону когезии, приведенное по температуре и давлению, $\text{м}^3/\text{мин}$; S – площадь боковой поверхности зона когезии (в расчетах нами принято, что зона когезии выглядит в форме конуса и газ проходит через боковую поверхность зоны когезии через «коксовые окна». Угол в вершине конуса принят равным 60°), м^2 ; РН – рудная нагрузка, т/т ; γ_k и γ_a – насыпной вес кокса и агломерата соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$.

5) средняя плотность газа в печи определяется исходя из среднего состава газа с учетом поправки на температуру (начала и конца размягчения агломерата) и давление;

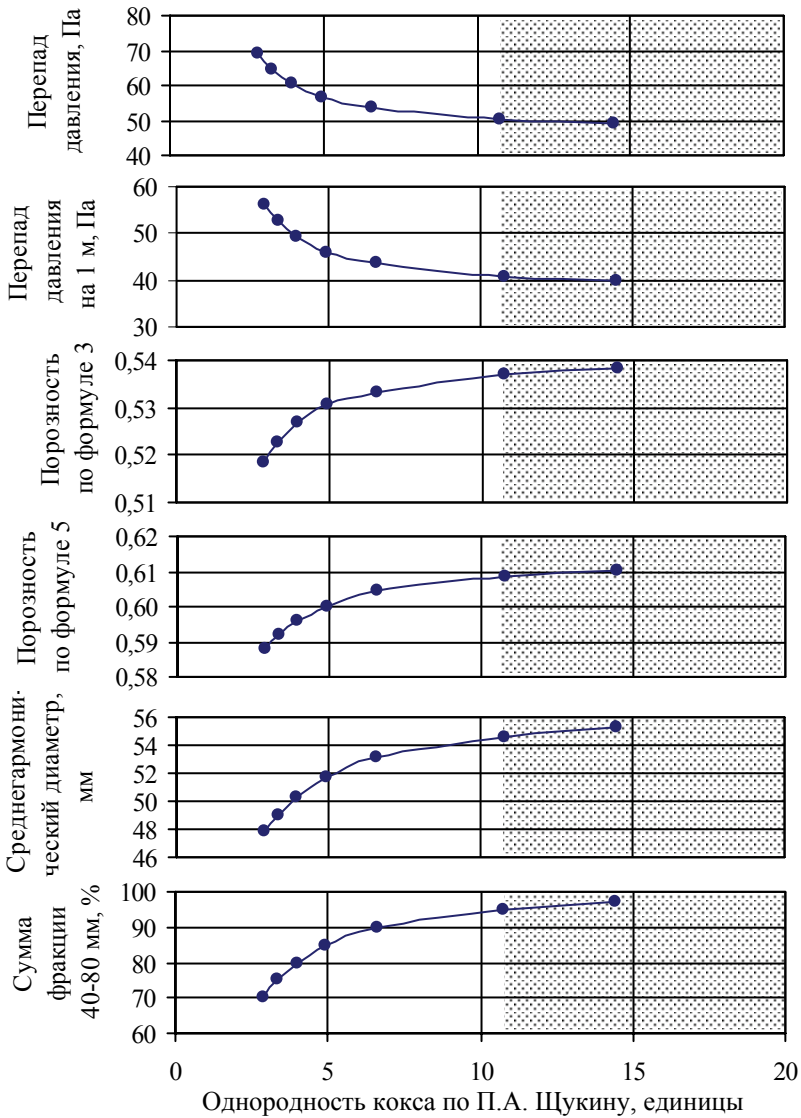
Для сопоставления порозности, рассчитанной по формуле (3), воспользуемся общеизвестной формулой, зависящей от среднегармонического размера кокса

$$\varepsilon = 0,222 \cdot d_{\text{гарм}}^{0,252}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (5)$$

Однородность кокса оценивали по формуле Щукина П.А. [23, с.74]

$$Ko = \frac{40 - 80 \text{ мм, \%}}{> 80 \text{ мм, \%} + 25 - 40 \text{ мм, \%}} \quad (6)$$

Результаты расчета перепада давления, среднегармонического диаметра, порозности по формулам (3) и (5) и однородности кокса приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, при увеличении суммы фракции 40–60 и 60–80 мм от 69,8 до 97% и, следовательно, однородности кокса от 2,89 до 14,45 единиц перепад давления газа, проходящего через слой кокса, снижается от 69,18 до 49,01 Па: при этом происходит повышение порозности, рассчитанные по формулам (3) и (5) и среднегармонического диаметра кусков кокса от 47,8 до 55,3 мм. Характер кривой свидетельствует о том, что оптимальное значение суммы классов 40–60 и 60–80 мм должно быть выше 95%.



Заштрихованная область – оптимальное значение параметра

Рис.1. Зависимости комплексных показателей качества кокса от его однородности

Таким образом, при подготовке к строительству пылеугольных установок на металлургических предприятиях Украины необходимо обеспечить современную подготовку кокса к доменной плавке, обеспечивающую максимальную эффективность вдувания ПУТ.

Выводы.

1. Рассчитанные комплексные показатели качества скипового кокса свидетельствуют о том, что наименьшее значение перепада давления газа, максимальные однородность и порозность кокса достигаются при содержании суммы классов 40–60 и 60–80 мм выше 95%.

2. Подготовка к строительству пылеугольных установок в Украине должно сопровождаться также освоением современной системы подготовки кокса к доменной плавке, обеспечивающей повышение содержания в скиповом коксе фракций 40–60 и 60–80 мм до 95% и выше, что наравне с другими компенсирующими мероприятиями обеспечит повышение оптимального расхода и эффективности применения ПУТ.

1. *Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Афанасьева З.К.* Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 31 с.
2. *Ярошевский С.Л.* Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии. – Донецк: Норд компьютер, 2006. – 16 с.
3. *Разрушение и стабилизация кокса на тракте подачи в доменный цех /В.А.Улахович, А.П.Котов, В.И.Солодков и др. //Кокс и химия. – 1978. – № 6 – С.21–25.*
4. *Транспортирование и подготовка кокса к доменной плавке /А.П.Котов, В.А.Улахович, В.И.Солодков и др. //Кокс и химия. – 1982. – № 4 – С.15–19.*
5. *Исследование динамики разрушения кокса в процессе его транспортирования к доменным печам /З.А.Власова, В.Д.Музыка, Л.Р.Безушко, Л.М.Турченкова // Кокс и химия. – 1985. – № 11 – С.19–21.*
6. *Степанов Ю.В., Абрамичева А.И., Беляева Л.И.* Изменение физико–механических свойств кокса в процессе транспортирования от рампы до скипа доменной печи // Кокс и химия. – 1983.– № 8. – С. 14–16.
7. *Изменение свойств кокса в шахте доменной печи 2700 м³ /А.П.Котов, А.С.Пляшкевич, Н.М.Бабушкин и др. // Металлург. – 1974. – № 3 – С.10–12.*
8. *Семисалов Л.П., Баскина Е.Б., Нестеренко О.А.* О реакционных свойствах кокса в условиях работы доменной печи // Кокс и химия. – 1969. – № 2 – С.20–22.
9. *Чернов Н.Н.* Об оптимальной крупности шихтовых материалов доменной плавки // Металлург. – 1967.– № 5. – С. 9–10.
10. *Котов К.И., Пинчук С.И.* Об оптимальных размерах и рациональном использовании мелких фракций кокса // Металлург. – 1968.– № 5. – С.7–9.
11. *Остроухов М.Я.* О разрушении кокса в доменной печи // Исследование доменного процесса. – М.: Академия наук СССР, 1957. – С.177–195.
12. *Толстой А.П., Скляр М.Г., Литвинов О.В.* III международный конгресс по коксохимическому производству // Кокс и химия. – 1997.– № 4. – С.2–7.

13. *Chen J., Xu W., Qian H.* Influence of high PCR operation on coke degradation in the blast furnace // 3 rd International Conference Science and Technology Ironmaking, June 16–20, 2003, Pittsburgh, PA. Düsseldorf. – P.160–165.
14. *Toxopeus H., Stel J., Molenaar R.* PCI at the turn of the century // 4th European Coke and Ironmaking Congress, June 19–22, 2000 Paris La Defense, France. Proceedings, Volume 1. – P.204–211.
15. *Fruehan R.J.* Future ironmaking in North America // ICSTI Ironmaking conference proceeding,. – 1998. – P. 59–66.
16. *Ухмылова Г.С.* Стратегия металлургического завода в Таранто фирмы «Илва» по использованию кокса и угля в доменном производстве // Кокс и химия. – 1997.– № 7. – С.18–20.
17. *Об оптимальной крупности кокса для доменной печи* /В.А. Улахович, К.К. Шкодин, А.П. Котов и др. // Сталь. – 1982. – № 12 – С.34–38.
18. *Цишкале В., Эсфельд Г., Шарло У.* Высококачественный кокс – основное условие эффективной доменной плавки // Черные металлы. – 1992.– № 5. – С.24–32.
19. *Опыты по применению кокса различной крупности в доменных печах* /В. Айзенхут, К. Энгель, В. Крафт и др. // Черные металлы. – 1979.– № 2. – С.25–30.
20. *Тайхерт Э., Гунта В.Н.* Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м // Черные металлы. – 1976.– № 14–15. – С.19–23.
21. *Цикарев Д.А.* Механическая обработка кокса из высокозольных угольных шихт // Кокс и химия. – 1997. – № 8 – С.13–15.
22. *Томаш А.А.* Углубление теоретических положений расчета порозности зернистого материала // Труды V-го международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск–Кривой Рог, 7–12 июня, 1999 г. – Днепропетровск: Пороги, 1999 – С.273–276.
23. *Доменное производство: Справочник.* / Под ред. И.П.Бардина. – Том 1. –М.: Металлургиздат, 1963.

Сведения о докладчике:

Кузин Андрей Викторович, канд.техн.наук, доцент кафедры РТП Донецкого национального технического университета;

Ярошевский Станислав Львович, докт.техн.наук, профессор кафедры РТП Донецкого национального технического университета,

Кузнецов А.М., начальник доменного цеха ОАО «Енакиевский металлургический завод»