

Д.А.Степаненко, А.Ф.Хамхотько, А.Д.Джигота

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

Целью работы является определение количества образующейся коксовой мелочи при истирании металлургического кокса и оценка ее влияния на свойства доменных шлаков. Выполнены экспериментальные исследования и произведена оценка общего количества пылевидной фракции кокса, образовавшейся в процессе испытания и его узких классов крупности в «Микум»–барабане. Предложено уравнение для оценки количества вовлекаемой шлаковым расплавом пылевидной фракции кокса. Выполнена оценка влияния коксовой мелочи на вязкость шлакового расплава.

доменная печь, коксовая мелочь, индекс истираемости, исследования, гетерогенность, шлак, расплав, свойства.

Актуальность проблемы. Многолетний опыт работы доменных печей показывает, что использование в доменной плавке кокса с низкими прочностными характеристиками, высокой дробимостью и истираемостью способствует образованию большого количества мелочи и углеродистой пыли в горне доменной печи. При вдувании пылеугольного топлива в доменную печь, ввиду технологических особенностей, происходит замусоренность продуктов плавки за счет наличия в около фурменной зоне частиц несгоревшей или сгоревшей не полностью угольной пыли. При неудовлетворительном смешивании природного газа и дутья в полости воздушных фурм и неполном сгорании газа происходит обильное образование сажистого углерода. Как показано в работах [1–4] наличие в шлаковом расплаве различных углеродистых добавок (коксовая пыль, ПУТ, сажа и др.) увеличивает их вязкость и плавкость и как следствие нарушается ровность хода печи, затрудняется переход серы из металла в шлак, ухудшается дренажная способность продуктов плавки в горне доменной печи. Эти явления способствуют загромождению горна, увеличению количества прогаров воздушных фурм, и, соответственно, снижению производительности доменной печи и увеличению расхода кокса.

Изложение основных материалов исследования. Для обеспечения нормальных условий работы доменной печи большое значение имеют физико–механические свойства кокса. Высокое качество кокса в большой мере представляет собой комплекс его параметров, обеспечивающих выполнение главных функций кокса в доменном процессе, одной из которых является обеспечение стекания в горн жидких продуктов плавки (чугуна и шлака) и поддержание их физико–химических свойств (в том числе вязкости) на должном уровне. Нежелательным аспектом работы кокса в высокотемпературной зоне доменной печи является процесс его разрушения, который происходит под влиянием многочисленных внутренних и внеш-

них факторов: внесения в печь коксовой мелочи, образованной при транспортировке кокса и не отсеянной до его загрузки в печь; истирания кокса при загрузке; разрушения кусков в доменной печи под воздействием термических, физико–механических и физико–химических условий. Со стороны кокса этим явлениям противостоят его физико–механические свойства и термомеханическая прочность.

Одним из основных факторов, снижающих жидкоподвижность шлаков в горне доменной печи за счет повышения степени их гетерогенности, является наличие в горне значительного количества коксовой пыли [1,4], а главным свойством кокса, регулирующим эти процессы, представляется его устойчивость к истиранию. В связи с этим, с целью оценки влияния коксовой мелочи на свойства доменных шлаков были выполнены исследования истираемости кокса и проведена оценка количества образующейся при этом коксовой пыли

Индекс истираемости кокса M_{10} (принятый в нормативно – технической документации как фракция крупностью менее 10 мм, образующаяся при разрушении кокса) служит характеристикой его физико – механических свойств и представляется наиболее важным. Вместе с тем, в контексте задач изучаемой проблемы важно оценивать процесс образования и количество более мелких, в том числе и пылевидных частичек кокса.

Накопленный научный потенциал изучения взаимосвязей показателей истираемости кокса, с его химическим составом, дает представление об общих закономерностях влияния основных характеристик химического состава кокса (зольность и сернистость) на его механическую прочность [5–7]. Так, повышение зольности кокса однозначно способствует увеличению индекса истираемости. Что касается сернистости, то, в общем виде, ее увеличение снижает механическую прочность кокса, однако, механизм этой закономерности определяется преимущественно свойствами углей.

Выполнены экспериментальные исследования образования мелких фракций различных проб кокса в одинаковых условиях при одновременном воздействии на испытываемую пробу кокса высокой температуры (650°C), окислительной газовой среды (воздух) и механической нагрузки (вращающийся барабан). Навеска кокса составляла 200 г, крупностью 6–10 мм, расход воздуха – 20 л/мин, частота вращения барабана – 30 мин^{-1} , время испытания – 45 мин. После испытания остаток кокса рассеивали на сите с размером отверстий 1 мм. Оценивали общее количество пылевидной фракции, образовавшейся в процессе испытания. Результаты исследования приведены в табл.1.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что образование пылевидных фракций кокса <1 мм в условиях термомеханического воздействия, близкого к условиям в доменной печи, соответствует индексу истираемости M_{10} . Более высокая прочность на истирание – у скипового кокса. В то же время количество пылевидных фракций у скипового кокса

больше, чем у металлургического. Это объясняется тем, что металлургический кокс в процессе транспортировки подвергся разрушению с образованием преимущественно зернистых частиц, а у скипового кокса, в котором ослабленные поверхностные участки кусков уже реализованы на стадии его подачи до скипов доменных печей, при истирании образуется больше тонко дисперсной фракции.

Таблица 1. Образование коксовой мелочи (<1 мм) при испытании металлургического и скипового кокса

№ п/п	Металлургический кокс		Скиповый кокс	
	M ₁₀	Фракция <1 мм, %	M ₁₀	Фракция <1 мм, %
1	7,9	78,5	7,3	79,5
2	7,4	78,0	7,4	81,6
3	6,8	73,5	7,1	77,4
4	7,0	78,8	7,3	68,6
5	7,7	74,6	7,5	76,6
6	7,6	69,2	7,0	71,2
7	6,9	65,4	7,1	69,8

В этом процессе происходит ряд этапов трансформации состава и свойств кокса под воздействием тепловых, физико-химических и механических воздействий условий плавки. Когда ослабленный кокс поступает в фурменную зону, его разрушение становится значительным, что увеличивает нежелательное образование коксовой мелочи, и особенно ее пылевидной составляющей, которая скапливается в зонах с низкой скоростью газа и вовлекается шлаковым расплавом.

Исследовали узкие классы крупности металлургического кокса по методике ИЧМ. Для исследования выбрали три вида кокса: кокс текущего периода КрКХЗ – с 1 и 2 коксовых батарей (1); кокс высокого качества КрКХЗ в 1988г. – мокрого тушения (2); а также кокс сухого тушения – Авд. КХЗ в 1988г. (3). Для характеристики физических параметров определяли влажность кокса (W^p , %), его зольность (A^c , %), пористость (Π , %), кажущуюся плотность ($\gamma_{нас.}$, г/см³), структурную прочность (СП, %). Разрушение узких классов крупности кокса производили в «Микум»-барабане при его вращении 100 об/мин, а термохимическую обработку производили в специальном реакторе путем частичной газификации кокса натуральной крупности. Испытывали пробы узких классов крупности, мм: >80; 60 – 80; 40 – 60; 25 – 40. Особое внимание обращали на образование пылевидной фракции (< 0,5 мм) в получаемой коксовой мелочи. Масса проб 50 кг. Результаты представлены в табл.2. Результаты испытания механической прочности узких классов крупности кокса в «Микум»-барабане (табл.2) показали, что показатели прочности M₂₅ и M₁₀ диффе-

ренцируют коксы различного качества, в том числе и по склонности к образованию пылевидной фракции. Наиболее высокими отличиями значений прочности отличались крупные классы кокса крупностью (>80 и 60 – 80 мм) высокого качества (2,3). Кокс классов крупности 40 – 60 и 25 – 40 мм в меньшей степени зависит от общего уровня качества.

Таблица 2. Результаты испытания механической прочности узких классов крупности кокса в «Микум» – барабане

Вид кокса	Класс крупности, мм	Гранулометрический состав (%) по классам крупности, мм							Показатели прочности,	
		>80	60 – 80	40 – 60	25 – 40	10 – 25	< 10		M ₂₅	M ₁₀
							10 – 0,5	<0,5		
1	25 – 40	–	–	–	85,5	8,0	3,5	3,0	85,5	6,5
	40 – 60	–	–	59,2	30,0	4,0	4,0	2,8	89,6	6,8
	60 – 80	–	42,0	21,6	22,8	4,0	5,1	4,5	86,4	9,6
	>80	12,8	34,0	19,6	16,8	4,4	5,5	7,1	83,2	12,4
2	25 – 40	–	–	–	86,0	8,0	3,9	2,1	86,0	6,0
	40 – 60	–	–	70,5	20,0	2,5	4,5	2,5	90,5	7,0
	60 – 80	–	52,0	21,0	14,5	4,6	4,8	3,1	87,5	7,9
	>80	31,2	28,8	15,4	10,5	5,3	5,0	3,8	85,9	8,8
3	25 – 40	–	–	–	87,5	6,2	4,0	2,3	87,5	6,3
	40 – 60	–	–	73,0	16,8	3,4	4,3	2,5	89,8	6,8
	60 – 80	–	51,2	22,3	13,5	5,0	5,0	3,0	87,0	8,0
	>80	33,5	25,3	17,5	10,2	4,7	5,1	3,7	86,5	8,8

Примечания: 1 – кокс текущего периода КрКХЗ с 1 и 2 коксовых батарей; 2 – кокс высокого качества КрКХЗ 1988г., мокрого тушения; 3 – кокс Авд. КХЗ сухого тушения 1988г.

Однако, разница в качестве, как общей массы кокса, так и его отдельных узких классов крупности хорошо видна на примере формирования гранулометрического состава кокса в результате разрушения его крупных классов крупности. Характерным показателем этого процесса может служить доля сохранившегося количества кокса каждого класса крупности после испытания в барабане, а также количество образующейся в процессе разрушения пылевидной фракции. По этим критериям кокс текущего производства соответствует коксу высокого качества только на 60% по крупным классам крупности (>60 мм) и на 80% – по средним (25–60 мм).

Выполненные исследования позволили предложить формулу для расчета количества пылевидной фракции коксовой мелочи, которая вовлекается шлаковым расплавом в горне доменной печи ($D_{\text{доб}}$):

$$D_{\text{доб}} = K \cdot \frac{PK_{\text{уд.}} \cdot M_{10}}{\text{Шл} \cdot 100}, \text{ кг/т шл.} \quad (1)$$

где K – коэффициент, определяющий долю пылевидной фракции (табл.3) в общем количестве коксовой мелочи <10 мм (M_{10}), безразмерный; $PK_{\text{уд.}}$ – удельный расход кокса, кг/т чугуна; M_{10} – значение показателя механической прочности кокса на истирание, %; Шл – выход шлака, т/т чугуна.

По формуле (1) выполнен ориентировочный расчет количества пылевидной фракции коксовой мелочи различной крупности для реальных условий доменной плавки в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Для этого приняты исходные данные:

1. Удельный расход кокса $PK_{\text{уд.}}=500$ кг/т чугуна;
2. Показатель механической прочности кокса на истирание $M_{10}=7\%$;
3. Выход шлака Шл=0.4 т/т чугуна.

Расчетные величины количества пылевидной фракции кокса, образующейся в горне доменной печи, приведены в табл.3.

Таблица 3. Величины коэффициента (K) и количества $D_{\text{доб}}$ соответственно крупности пылевидной фракции кокса

Размер частиц коксовой пыли, мм	<1	$<0,5$	$<0,1$
K	0,65–0,80	0,35–0,56	0,20–0,25
$D_{\text{доб}}$, кг/т шлака	56,875–70	30,625–49	17,5–21,875
$D_{\text{доб}}$, % от массы шлака	5,69–7	3,06–4,9	1,75–2,19

Анализ приведенных данных свидетельствует, что количество пылевидной фракции кокса, которая может попасть в шлаковый расплав, уменьшается с уменьшением крупности частиц. Тем не менее, для самых мелких частиц $<0,1$ мм величина $D_{\text{доб}}$ составляет около 2% к массе шлака.

Для объективной количественной характеристики влияния различных добавок, в частности коксовой мелочи, на свойства шлаковых расплавов, вязкость (η), температуру солидус и ликвидус (T_c , T_l) ранее нами предложено использовать градиент–критерий, показывающий относительное увеличение свойства в процентах на каждый процент добавки ($\Delta\eta$, ΔT_c , ΔT_l) [8,9].

На основе корреляционно–регрессионного анализа связи градиентов с химическим составом шлаков получены модели для прогнозирования величины градиентов [9]:

$$\Delta \eta, \Delta T_c, \Delta T_l = f(\Delta e, \rho), \quad (2)$$

где Δe и ρ – параметры структуры шлаков по [10].

После расчета величины градиентов по химическому составу шлаков по формуле (2) и определения свойств гомогенных шлаков по ранее разработанной нами методике [11] появляется возможность рассчитать свойства шлаков с углеродсодержащими добавками с целью оценки их негативного влияния и принятия соответствующих технологических воздействий:

$$\eta_{доб}, T_{с,доб}, T_{л,доб} = \eta_o, T_{с,o}, T_{л,o} \cdot \left[1 + \frac{\Delta \eta, \Delta T_{с}, \Delta T_{л} \cdot D_{доб}}{100} \right], \quad (3)$$

где $\Delta \eta, \Delta T_{с}, \Delta T_{л}$ – соответственно градиенты вязкости, температуры солидус и ликвидус добавками, %/%; $\eta_o, T_{с,o}, T_{л,o}$ – соответственно вязкость, Па·с, температуры солидус и ликвидус, °С, гомогенного шлака без добавок; $\eta_{доб}, T_{с,доб}, T_{л,доб}$ – те же свойства с добавками; $D_{доб}$ – количество добавок в % к массе шлака.

Если учесть, что градиент вязкости для Авдеевского кокса, который используется на ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» составляет 76,4% на каждый % добавки [9], то вязкость гетерогенного шлака, как следует из формулы (3) составит:

$$\eta_{доб} = \eta_o \left(1 + \frac{\Delta \eta \cdot D_{доб}}{100} \right) = \eta_o \left(1 + \frac{76,4 \cdot 2}{100} \right) = 2,5 \cdot \eta_o, \quad (4)$$

то есть увеличится в 2,5 раза, что может существенно ухудшить жидкоподвижность шлакового расплава.

В реальных условиях такого увеличения вязкости шлакового расплава может не наблюдаться, поскольку, ее снижению способствует зола кокса и как показали исследования Жеребина Б.Н., Горбачева В.П. и Кудоярова М.С. [12] устойчивая графито–шлаковая суспензия образуется только при постоянном перемешивании расплава. Отсюда вытекает одна из рекомендаций о необходимости снижения турбулентности шлакового расплава перед выпуском для предотвращения усиления его гетерогенности.

Выводы.

1. Выполнены экспериментальные исследования образования мелких фракций различных проб кокса. Произведена оценка общего количества пылевидной фракции кокса, образовавшейся в процессе испытания и его узких классов крупности в «Микум»–барабане.
2. По результатам проведенных исследований предложено уравнение и выполнена оценка количества пылевидной фракции коксовой мелочи, которая вовлекается шлаковым расплавом в горне доменной печи.
3. На основе разработанного ранее градиента–критерия, показывающего относительное увеличение свойства шлакового расплава в процентах на каждый процент добавки, в сырьевых условиях работы ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог», выполнен расчет вязкости шлакового расплава, содержащего коксовую мелочь. Установлено, что наличие в шлаковом рас-

плаве порядка 2% коксовой пыли с размером частиц $<0,1$ мм потенциально способно увеличить их вязкость в 2,5 раза.

1. *Бачинин А.А.* Исследование физических свойств натуральных доменных шлаков различной основности / А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко, В.М.Хоменко и др. // *Металлы*. – 1997. – №4. С.31–37.
2. *Поляков А.А.* Исследование вязкости гетерогенных шлаков / А.А.Поляков, Е.Ф.Вегман, В.С.Валавин // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. – 1985. – №1. – С.146.
3. *Чижиков В.М.* Вязкость гетерогенных шлаков, содержащих топливо / В.М.Чижиков, А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко // *Изв. ВУЗов ЧМ*. – 1987. – №5. – С.145–146.
4. *Бачинин А.А.* Результаты изучения физических свойств доменных шлаков металлургического комбината им. Ильича / А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко, Г.А.Бачинина и др. // *Сталь*. – 1996. – №10. С.7–13.
5. *Джигота А.Д.* Анализ факторов, влияющих на полноту сгорания топлива в горне доменной печи / А.Д.Джигота, Н.М.Можаренко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №1. – С.10–12.
6. *Джигота А.Д.* Особенности проявления физико–механических и физико–химических свойств кокса в доменной печи / А.Д.Джигота, Н.М.Можаренко, А.С.Нестеров М.Г.Джигота // *Наукова думка. Сб. трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. – 2005. – Вып. 11. – С.27–33.
7. *Ухмылова Г.С.* Требования современных доменщиков к качеству кокса / Г.С. Ухмыловой // *Реф. Кокс и химия*. – 2001. – №4. – С.24–46.
8. *Хамхотько А.Ф.* Оценка влияния углеродсодержащих добавок на свойства доменных шлаков / Д.Н.Тогобицкая, И.В.Грипас // *Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* // *Выпуск №13, 2006*. – С.216–224.
9. *Тогобицкая Д.Н.* Влияние микро– и макрогетерогенности на свойства доменных шлаков / Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, Д.А.Степаненко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №5, 2009. – С.12–15.
10. *Приходько Э.В.* Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов // *Изв. АН СССР. Неорганические материалы*. – 1990. – Т.16. – №5. – С.900–906.
11. *Оторвин П.И., Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И. и др.* Совершенствование шлакового режима доменной плавки в сырьевых условиях КГТМК «Криворожсталь». – *Сталь*. – 2004. – №6. – С.24–28.
12. *Жеребин Б.Н.* Влияние заграфиченности на физические свойства магнезиально–глиноземистых доменных шлаков / Б.Н.Жеребин, В.П.Горбачев, М.С.Кудояров // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. – 1972. – №6. – С.22–25.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук, проф. Д.Н.Тогобицкой*

Д.О.Степаненко, А.Ф.Хамхотько, О.Д.Джигота

Оцінка впливу дрібного коксу на технологічні властивості доменних шлаків.

Метою роботи є визначення кількості коксової дрібності, що утворюється, при стиранні металургійного коксу і оцінка її впливу на властивості доменних шлаків. Виконано експериментальні дослідження та оцінка загальної кількості пилоподібної фракції коксу, що утворилася в процесі випробування і його вузьких класів в «Мікум»–барабані. Запропоновано рівняння для оцінки кількості пилоподібної фракції коксу, що залучається шлаковим розплавом. Виконано оцінку впливу дрібного коксу на в'язкість шлакового розплаву.