

А.С.Нестеров, В.И.Большаков, Н.М.Можаренко

## ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ НА КОКСОВОЙ НАСАДКЕ ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Целью работы является изучение уровня изменения технологических параметров шихтовых материалов и их влияния на эффективность применения пылеугольного топлива в технологии доменной плавки. Показано, что определяющим звеном эффективности замены части кокса подготовленным пылеугольным топливом является стабильность качества кокса при высоких температурах и рациональное распределение железорудных материалов по сечению доменной печи.

**доменная плавка, замена части кокса, пылеугольное топливо, стабильность качества, эффективность**

**Современное состояние вопроса.** Несмотря на успехи в подготовке пылеугольного топлива к доменной плавке, улучшение узлов ввода, совершенствование технологии сжигания пылеугольного топлива часть его не сгорает в пределах фурменной зоны, ухудшая дренажную способность горна со всеми вытекающими отсюда неблагоприятными последствиями. Это уменьшение коэффициента замены кокса пылеугольным топливом, прогары воздушных фурм, простои, снижение производительности и т.д. Теоретические исследования и промышленный опыт показывают, что эффективная замена кокса пылеугольным топливом происходит при высоком уровне металлургических свойств кокса и железорудного сырья, а также обеспечении максимальной газификации пылеугольного топлива в пределах фурменной зоны [1–5].

**Цель и постановка задачи.** Технологические отличия в ведении доменной плавки при замене части природного газа пылеугольным топливом потребуют уменьшения обогащения дутья кислородом, что будет сопровождаться снижением производительности. Кроме этого, ввод ПУТ при сокращении расхода природного газа приведет к увеличению прихода серы и щелочей, а также к изменению количества и состава конечного доменного шлака. При вдувании пылеугольного топлива в доменную печь в шлак попадают частицы несгоревшей или частично–сгоревшей угольной пыли. При неудовлетворительном смешивании природного газа и дутья в полости воздушных фурм и при неполном сгорании газа происходит обильное образование сажистого углерода. Все эти гетерогенные включения повышают вязкость промежуточных и конечных доменных шлаков, в результате чего 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 доменных печей, увели-

чению расхода кокса и снижению качества чугуна. За последние 40 лет опубликован ряд работ по оценке влияния различных углеродсодержащих добавок на свойства доменных шлаков, в том числе за счет попадания в него несгоревших частиц пыли [6–17]. Исследования свойств шлаков с добавками угольной пыли показали, что максимальное влияние пылеугольного топлива на вязкость шлака находится в области температур его кристаллизации, с повышением температуры влияние несгоревших частиц пыли на вязкость шлака уменьшается [14]. Разработанные диаграммы плавкости шлаков, загроможденных частицами ПУТ, являются наглядными для конкретных указанных условий, однако не являются универсальными и использование их затруднительно для других пользователей. Анализ показывает, что для эффективного применения пылеугольного топлива в технологии доменной плавки целесообразно оценить уровень изменения технологических параметров для шихтовых условий конкретного металлургического предприятия (в частности изменение состава и свойств первичных, промежуточных и конечных шлаковых расплавов), определить узкие места формирования и истечения шлакового расплава по сечению доменной печи и разработать технологический регламент «мягких» и интенсивных промывок горна доменных печей от кокса мелких фракций и несгоревшего пылеугольного топлива.

**Изложение материалов исследования.** Для уточнения влияния ввода мелкодисперсных частично сгоревших крупинок пылеугольного топлива на вязкостные характеристики гомогенного шлакового расплава были проведены эксперименты на лабораторном жидкостном вискозиметре методом капилляра (истечения). В качестве исследуемых жидкостей использовали силиконовые масла (ПМС–200, ПМС–500, ПМС–900) различных вязкостей, стабильных в температурном диапазоне от 5 до 25<sup>0</sup>С. Угольную пыль, дробили до фракции 500 мкм, после чего прокачивали до потери 75 и 85% массы исходного угля. Измерение вязкости проводили, добавляя в силиконовые масла различных марок частично сгоревшее пылеугольное топливо в пределах от одного до семи процентов. Для лучшего распределения высокой доли (пяти и семи процентов) частично сгоревшего угля по объему исследуемых жидкостей последние нагревали до температуры 40–42<sup>0</sup>С, после чего в течение 6–8 часов охлаждали.

Результаты испытаний, представленные в табл.1, показывают, что в зависимости от характеристик расплава и степени сжигания пылеугольного топлива, вязкость шлаковых расплавов увеличивается на 0,2–1,8 Пуаз. Для конечных доменных шлаков в области температур 1500–1550<sup>0</sup>С увеличение вязкости шлака на 0,2–0,3 пуаза, как уже было отмечено, не должно повлиять на режим отработки продуктов плавки, в то же время для промежуточных шлаковых расплавов ( $\eta=9-10$  пуаз) увеличение вязкости на 1,5–2,0 пуаза в температурном диапазоне 1350–1450<sup>0</sup>С может создавать дополнительные требования к распределению шихтовых мате-

риалов по сечению доменной печи. Это относится как к железорудному сырью, так и к коксу.

Таблица 1. Изменение вязкости имитационных жидкостей в зависимости от количества и свойств частично сгоревшей угольной пыли.

Марка угля	Масса частично сгоревшего ПУТ, %	Масса остатка углеорода в частично сгоревшем пылеугольном топливе, %		Вязкость, пуаз	Время, сек
		5	15		
ПМС–200	0	–	–	1,98	1874
ПМС–200	1	5	–	2,09	1969
ПМС–200	3	5	–	2,16	2024
ПМС–200	5	5	—	2,21	2068
ПМС–200	7	5	–	2,26	2098
ПМС–200	1	–	15	2,12	2005
ПМС–200	3	–	15	2,22	2081
ПМС–200	5	—	15	2,27	2148
ПМС–200	7	–	15	2,29	2180
ПМС–500	0	–	–	5,02	4750
ПМС–500	1	5	–	5,12	4844
ПМС–500	3	5	–	5,28	5008
ПМС–500	5	5	—	5,65	5360
ПМС–1000	0	5	–	8,81	8242
ПМС–1000	1	5	–	9,25	8672
ПМС–1000	3	5	–	9,52	8917
ПМС–1000	5	5	—	9,65	8767
ПМС–1000	7	5	–	9,78	9148
ПМС–1000	1	–	15	9,42	8819
ПМС–1000	3	–	15	9,78	9148
ПМС–1000	5	—	15	9,88	9243
ПМС–1000	7	–	15	Н.д	Н.д

Для уточнения влияния введения 1–7 % частично несгоревшего пылеугольного топлива на состав и свойства промежуточных шлаковых расплавов проведены исследования формирования первичных шлаковых расплавов, локально образованных из агломерата, окатышей и их смесей в различном соотношении. Результаты расчетов представлены в табл.2. Из таблицы видно, что температуры потери газопроницаемости железорудного слоя и начала фильтрации жидких фаз из агломерата и окатышей различаются на 80–100<sup>0</sup>С.

Таблица 2. Расчетный состав и свойства первичных шлаковых расплавов в зависимости от доли окатышей по сечению печи в железорудной смеси

Соотношение агломерата и окатышей, %:%	ПУТ	Содержание компонентов в первичном шлаковом расплаве, %						Температура, °С		Вязкость при 1450°С	Пов. натяжение
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	С	потери газопро-ница-емости слоя	начала фильтра-ции жидких фаз		
100:0	–	46,47	33,15	3,65	8,07	8,65	–	1327	1458	9,84	284,9
88:12	–	44,20	33,48	3,38	11,22	7,71	–	1315	1436	6,75	294,3
67,3:32,4	–	40,5	33,75	2,82	17,45	5,49	–	1295	1396	4,39	311,1
60,1:39,9	–	39,20	33,80	2,58	19,42	5,00	–	1290	1390	3,75	317,0
57,3:42,7	–	37,91	33,25	2,53	21,48	4,82	–	1285	1390	3,37	324,3
20:80	–	32,60	35,44	1,95	28,16	1,84	–	1265	1365	1,91	338,5
0:100	–	28,67	34,13	1,05	35,03	1,11	–	1250	1355	2,53	362,1
100:0	+	44,24	33,94	4,66	8,40	8/23	0,45	1327	1470	11,32	284,9
88:12	+	41,98	33,94	4,45	11,60	7,32	0,45	1315	1446	7,78	294,3
67,3:32,4	+	37,27	33,87	3,21	18,21	6,95	0,45	1295	1410	4,87	311,1
60,1:39,9	+	37,24	34,20	3,69	19,67	4,5	0,45	1290	1400	4,13	317,0
57,3:42,7	+	36,05	33,73	4,59	20,85	4,58	0,45	1285	1400	3,67	324,3
20:80	+	30,97	35,80	2,9	28,35	1,64	0,45	1265	1375	2,04	338,5
0:100	+	27,23	34,56	2,33	34,67	1,05	0,45	1250	1365	2,78	362,1

Температурный диапазон полной потери газопроницаемости железорудного слоя и фильтрации первичных шлаковых расплавов из смеси агломерата и окатышей находится в пределах 1265–1465<sup>0</sup>С. Вязкость первичного шлака из агломератов основности 1,55–1,7 ед. при температуре 1450<sup>0</sup>С находится в пределах 9–12 пуаз, в отличие от 2,5–3,0 пуаз шлакового расплава, образованного из частично офлюсованных окатышей при тех же температурах. Минимальная расчетная вязкость первичного шлака в пределах 1,9–2,2 пуаза при температуре 1450<sup>0</sup>С получена для смеси агломерата и окатышей в пределах 75–85% к 15–25% соответственно. Ввод частично сгоревшего пылеугольного топлива, в количествах от одного до семи процентов от массы шлакового расплава, увеличивает вязкость промежуточных шлаков на 8–15%. Необходимо отметить, что если остатки ПУТ попадают в шлаковый расплав из окатышей, то вязкость шлакового расплава увеличивается на 0,2–0,5 пуаза, в отличие от попадания несгоревших частиц в промежуточные шлаки из агломерата, где вязкость увеличивается на 1,5–2,0 пуаза.

Для сохранения газодинамического режима в нижней зоне доменной печи, в том числе устойчивой фильтрации первичных шлаковых расплавов через коксовую насадку при ведении технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива, необходимо обеспечить распределение железорудных материалов по радиусу доменной печи таким образом, чтобы содержание FeO в первичном шлаковом расплаве в промежуточной зоне (на вертикали, проходящей по границе фурменного очага) в сравнении с базовым режимом было выше на 3,5–5,0%. В этой зоне 2,0–2,5% FeO первичного шлакового расплава будет реализовано при взаимодействии с остаточным углеродом пылеугольного топлива и 1–3% необходимо для ослабления влияния гетерогенности на вязкость шлакового расплава.

В лабораторных условиях проведена проплавка смеси агломерата и окатышей, а также смеси железорудных материалов и кокса мелких фракций на коксовой насадке, замусоренной остатками частично несгоревшего пылеугольного топлива. Сравнение результатов фильтрации расплавов через коксовую насадку фракции 7–10 мм и насадку, обработанную мелкофракционным частично сгоревшим топливом, показали, что температуры начала фильтрации жидких фаз для различных случаев практически не изменились. Содержание закиси железа в первичных шлаках уменьшилось на 0,8–2,0% для окатышей и 0,1–0,3% для агломерата. Масса остатка расплава в слое кокса при проплавке окатышей на коксовых насадках различных характеристик осталась на том же уровне. При проплавке в тех же условиях агломерата масса остатка расплава возросла на 2,5–4%. Визуально отмечено, что при проплавке окатышей и фильтрации расплавов через коксовую насадку с угольной пылью, образующиеся первичные шлаки после охлаждения выглядят более хрупкими и пористыми, что указывает на вспенивание шлаков, в частности, за счет повышенного газовыделения. Добавка в первичные шлаки, образованные из окатышей либо их смесей с агломератом, частично сгоревшего пылеугольного топлива при повторной проплавке показала, что содержание FeO в расплаве уменьшилось на 3–3,5% (табл.3).

Таблица 3. Состав и свойства первичных шлаковых расплавов в зависимости от доли окатышей в железорудной смеси

Смесь ЖРС и кокса		Наличие в коксовой насадке		Содержание компонентов в первичном шлаковом расплаве, %					Температура, °С		Масса остатка, %	Интервал вязко-состояния °С	Степень восстановления при 1050°С, R %
Соотношение агломер. и окат., %: %	Доля кокса мелких фракций	Фракция кокса 7–10	ПУТ	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	потери газопро-ницаемости	начала фильтр.			
100:0	0	+	–	46,47	33,15	3,65	8,07	8,65	1340	1475	32,0	288	79,4
100:0	0	+	+	46,32	33,57	3,60	7,58	8,92	1340	1480	34,0	296	н.д.
100:0	5	+	–	46,21	33,98	3,58	7,21	9,02	1350	1480	35,5	290	81,2
100:0	5	+	+	46,16	34,19	3,58	6,92	9,14	1350	1495	38,8	305	н.д.
88:12	0	+	–	44,20	33,48	3,38	10,80	7,71	1315	1450	28,2	298	97,1
88:12	0	+	+	44,91	33,52	3,41	10,50	7,66	1315	1450	30,0	305	н.д.
88:12	5	+	–	45,10	33,91	3,42	9,94	7,64	1325	1465	30,6	297	80,5
88:12	5	+	+	45,49	34,20	3,46	9,21	7,64	1325	1470	32,4	311	н.д.
60:40	0	+	–	39,20	33,80	2,58	21,42	5,00	1295	1410	22,8	296	78,9
60:40	0	+	+	38,73	33,38	2,72	20,24	4,97	1295	1410	23,2	298	н.д.
60:40	5	+	–	38,98	34,19	2,74	19,12	4,97	1300	1420	25,0	300	80,1
60:40	5	+	+	38,85	34,69	2,76	18,76	4,94	1300	1430	26,8	308	н.д.
20:80	0	+	–	32,60	35,44	1,95	28,16	1,84	1265	1365	12,0	283	77,32
20:80	0	+	+	33,57	36,49	1,98	26,14	1,82	1265	1370	12,4	285	н.д.
20:80	5	+	–	33,83	35,23	2,02	27,12	1,80	1270	1375	14,2	287	79,4
20:80	5	+	+	34,69	36,14	2,03	25,34	1,80	1270	1380	14,8	289	н.д.
0:100	0	+	–	28,67	34,13	1,05	37,03	1,11	1245	1360	9,8	295	76,8
0:100	0	+	+	28,36	34,59	1,07	34,87	1,10	1245	1360	10,2	296	н.д.
0:100	5	+	–	28,30	34,94	1,08	34,60	1,08	1245	1370	10,8	299	808
0:100	5	+	+	29,41	36,31	1,08	32,12	1,08	1245	1375	11,2	300	н.д.

Таблица 4. Время истечения калибровочных жидкостей различной степени замусоренности через коксовую насадку.

Марка эталонной жидкости	Замусоренность эталонной жидкости	Фракция кокса			Время, сек.		Объем вытекшей жидкости при	
		7–10	5–7	0,5–1,0	истечения	каплепадения	истечения	каплепадения
ПМС–200	0	100	–	–	16	60	88	7
ПМС–200	5	100	–	–	17,5	68	88	6
ПМС–200	0	80	20	–	18	183	86	10
ПМС–200	0	68	16	16	95	220	36	55
ПМС–200	5	68	16	16	–	428	–	78
ПМС–1000	0	100	–	–	92	330	76	8
ПМС–1000	5	100	–	–	106	345	74	10
ПМС–1000	0	80	20	–	112	400	74	9
ПМС–1000	0	68	16	16	–	1580	–	80
ПМС–1000	5	68	16	16	–	3180	–	35

Расчет состава и свойств первичного шлака из смеси агломерата и окатышей показывает, что при равномерном смешивании агломерата и окатышей по сечению доменной печи вязкость шлакового расплава находится в пределах 3,5–4,0 пуаз, расчетное содержание FeO в первичных шлаках в диапазоне температур 1400–1450<sup>0</sup>C находится на уровне 21–25% в зависимости от основности агломерата, что хорошо коррелируется с лабораторными экспериментами, где содержание FeO при доле окатышей 40% составляет 21%. При неравномерном распределении агломерата и окатышей по сечению доменной печи доля окатышей в локальном объеме смеси может находиться в пределах от 5–7% до 60–65%, при этом вязкость в температурном диапазоне 1400–1450<sup>0</sup>C может изменяться в пределах от 10–16 пуаз до 2,5–4,0 пуаз, а содержание FeO в первичных шлаках изменяется в диапазоне от 8 до 28%.

Для определения расчетной вязкости расплава, загроможденного пятипроцентным количеством частично сгоревшего пылеугольного топлива, по времени прохождения через коксовую насадку различного фракционного состава проведены испытания эталонных (по вязкости) жидкостей марок ПМС–200 и ПМС–1000 в области комнатных температур. Измеренные времена истечения жидкости проводили для жидкостей в чистом виде и при добавлении в силиконовые масла частично сгоревшего пылеугольного топлива. По условиям эксперимента имитационные жидкости марок ПМС–200 и ПМС–1000 в количестве 100 мл заливали в приемный тигель, используемый при горячем моделировании. Перфорированное дно приемного тигля перекрывается коксом фракции 7–10 мм массой 40 г. При холодном моделировании эксперименты проводили с коксовой насадкой фракции 7–10 мм и замене части насадки фракции 7–10 мм на фракции 5–7 и 0,5–1,0 мм. Результаты испытаний представлены в таблице 4. Анализ результатов показывает, что при хорошем качестве коксовой насадки время истечения замусоренной жидкости в зависимости от ее вязкости возрастает на 10–16% по сравнению с эталонными жидкостями, а при существенном увеличении количества кокса мелких фракций в насадке время фильтрации жидкости через коксовую насадку может возрасти практически вдвое.

**Заключение.** Проведенные расчетно–аналитические и лабораторные исследования показали, что вязкость промежуточных доменных шлаков при применении пылеугольного топлива повышается на 0,5–1,5 пуаза. Повышение гетерогенности шлакового расплава увеличивает вероятность загромождения горна коксовым мусором и не полностью сгоревшими частицами ПУТ. Определяющим звеном эффективности замены части кокса подготовленным пылеугольным топливом является стабильность качества кокса при высоких температурах и рациональное распределение железорудных материалов по сечению доменной печи.

1. *Ярошевский С.Л.* Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: – Металлургия, – 1988. – 166 с.
2. *Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П.* Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. – К.: – Техника, – 1993. – 200 с.
3. *Процессы* при вдувании угольных пылей в доменную печь/ Д.Летцель, Й.Хунгер, В.Крюгер и др. // Черные металлы. – 1999 (май).– №5. – С.20–28.
4. *Развитие* технологии вдувания пылеугольного топлива в доменную печь. / В.А.Ноздрачев, А.Формосо, А.И.Бабич и др. //Металлург. – №8. – 1998 г. – С.41–44.
5. *Современное* состояние вдувания ПУТ в Северной Америке / Мадху Д.Рэнзид, Дональд Г. Уайт, Дж. Дункан и др. // 4–й Европейский конгресс коксохимиков и доменщиков, 2000, Париж.
6. *Старшинов Б.Н., Синицкий В.Д.* О влиянии коксовой мелочи на физические свойства шлаков в доменной печи. // Шлаковый режим доменных печей. М.:Металлургия, 1967.– С.216–233.

7. Влияние режима сжигания природного газа на горение фурм доменной печи / И.П.Семика, К.М.Бугаев и др. //Сталь. –1968.– №6 –С.490–493.
8. Жеребин Б.Н., Горбачев В.П., Кудояров М.С. Влияние заграфиченности на физические свойства магнезиально–глиноземистых доменных шлаков //Изв. ВУЗов. Черная металлургия.– 1972.–№6.– С22.–25.
9. Понамаренко А.Г., Козлов Ю.А. О растворимости углерода в шлаках. // Металлы. – 1974. – №5. – С.73–80.
10. Свойства жидких доменных шлаков. / В.Г.Воскобойников, Н.Е.Дунаев, А.Г.Михалевич и др. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
11. Поляков А.А., Вегман Е.Ф., Валавин В.С. Исследование вязкости гетерогенных шлаков. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1985. – №1. – С.146.
12. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. / В.М.Бабосhev, Е.А.Кричевцов, В.М.Абзалов, Я.М.Щелоков. –М.: Металлургия, 1982. 152 с.
13. Чижикова В.М., Бачинин А.А., Нестеренко С.В. Вязкость гетерогенных шлаков, содержащих топливо. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. – №5.– С.145–146.
14. Нестеренко С.В., Хоменко В.М. Изучение физических свойств шлаков системы  $\text{CaO-MgO-SiO}_2-5\%\text{Al}_2\text{O}_3-2\%\text{S}-1\%\text{MnO}-1\%\text{FeO}-0,5\%\text{K}_2\text{O}$  с добавками пылеугольного топлива. // Сталь. –1989. – №8. – С.15–20.
15. Результаты изучения физических свойств доменных шлаков металлургического комбината им. Ильича. / А.А.Бачинин, С.В.Нестеренко, В.М.Хоменко и др. //Сталь. –1996.– №10 –С.7–13.
16. 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.
17. Андронов В.Н., Плоткин З.Ш. Горение угольной пыли в горне доменной печи //Сталь. – 1996. – №10. – С.7–13.

*Статья рекомендована к печати:  
заместитель ответственного редактора  
раздела «Доменное производство»:  
докт.техн.наук, проф. И.Г.Товаровский*

***О.С.Нестеров, В.І.Большаков, М.М.Можаренко***

### **Вивчення поведінки первинних шлакових розплавів на коксовій насадці при вдуванні пилувугільного палива**

Метою роботи є вивчення рівня зміни технологічних параметрів шихтових матеріалів і їх впливу на ефективність застосування пилувугільного палива в технології доменної плавки. Показано, що визначальною ланкою ефективності заміни частини коксу підготовленим пилувугільним паливом є стабільність якості коксу при високих температурах і раціональний розподіл залізорудних матеріалів переїном доменної печі.