

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.266.2/4

Дружков В.Г., Прохоров И.Е.

ВЫБОР РЕЖИМА ВЫПУСКА ЧУГУНА И ШЛАКА ИЗ ГОРНА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В 2014 году исполнится 50 лет, как впервые в мировой практике на доменной печи № 9 ММК внедрено устройство двух чугунных леток на отдельных литейных дворах. В настоящее время на доменных печах полезным объемом более 2700 м³ число чугунных леток достигает четырех. Снижение выхода шлака на тонну чугуна, увеличение высоты горна позволили на большинстве печей отказаться от выпуска шлака через шлаковые летки. Использование чугуновозных ковшей миксерного типа, внедрение стойкой заливной футеровки главных желобов, широкое распространение высококачественных леточных масс в значительной степени снизили трудоемкость горновых работ и способствовали изменению режима выпусков. Анализ отмеченных изменений в последние 20 лет и их взаимосвязи с режимом отработки чугуна и шлака уделялось недостаточно внимания, не внесены соответствующие изменения в технологические инструкции.

Основным параметром режима опорожнения горна от жидких продуктов плавки является число выпусков чугуна в сутки – N . Выпуски чугуна равномерно распределяют во времени, поэтому продолжительность цикла «накопление-выпуск» должна быть постоянной и равной (в минутах):

$$T = 24 \times 60 / N = 1440 / N. \quad (1)$$

Выполнение графика выпусков при ровной работе доменной печи и постоянство условия продувки чугунных леток должно приводить к равномерному распределению по выпускам массы чугуна, которая определяется

$$Q = P/N = (P/1440) \times (1440/N) = q_H \times T, \quad (2)$$

где P – производительность печи, т/сут; q_H – минутная производительность (скорость накопления чугуна), т/мин.

Современный уровень теории и практики доменного производства позволяет определить количество выпусков, при котором не будет условий для нежелательного вытеснения столба кокса в горне, аналитически решив балансовое уравнение:

$$N^* = \frac{q_H (1 - \frac{q_H}{q_0}) \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (1 + III)}{(1440 \cdot (\sigma_{BK} - \sigma_0) \cdot F_T \cdot \varepsilon)}, \quad (3)$$

где III – относительный выход шлака, т/т; ε – средняя степень заполнения кокса жидкими продуктами плавки, м³/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; q_0 – скорость опорожнения горна; F_T – площадь горизонтального сечения горна, м².

Входящие в уравнение (3) величины активного

давления столба шихты на горизонте фурм (σ_0) и среднего сопротивления вытеснению (σ_B) можно рассчитать по следующим зависимостям [1]:

$$\sigma_0 = \sigma_{ГФ} \cdot e^{-\frac{H_k}{A}} + \rho_K \cdot g \cdot A \cdot \left(1 - e^{-\frac{H_k}{A}}\right) \cdot 10^{-3}; \quad (4)$$

$$\sigma_B = \sigma_{ГФ} \cdot e^{+\frac{H_k}{A}} + \rho_K \cdot g \cdot A \cdot \left(e^{+\frac{H_k}{A}} - 1\right) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где ρ_K – насыпная плотность кокса в горне, кг/м³; H_k – высота столба кокса в горне, включая погруженную часть, м; $A = d_r / (4nf)$; d_r – диаметр горна, м; n – коэффициент бокового давления; f – коэффициент внутреннего трения; $\sigma_{ГФ}$ – среднее вертикальное давление столба шихты на горизонте фурм, кПа.

$$\sigma_{ГФ} = C \cdot \rho_{ш} \cdot g \cdot H_p \cdot (1 - v) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где $C = 0,17$ – доля активного давления на горизонте фурм от полного давления [2]; $\rho_{ш}$ – насыпная плотность шихты выше фурм, кг/м³; H_p – рабочая высота печи, м; $v = 0,5$ – степень уравнивания шихты подъемной силой газового потока; g – ускорение свободного падения, м/с².

Увеличение числа выпусков в прошлом, когда на печи была одна чугунная летка, сдерживалось рядом факторов: низким качеством огнеупорной леточной массы, уровнем механизации горновых работ и большими затратами времени на подготовку желобов к выпуску.

В настоящее время на доменных печах устанавливаются две и более чугунных леток (до четырех на печах большого объема), тем самым устраняют ограничения на рост числа выпусков.

Увеличение числа выпусков – не единственный путь уменьшения количества чугуна в горне перед выпуском. Последнее можно осуществить также за счет уменьшения объемной (массовой) скорости опорожнения (q_0) и увеличения, тем самым, продолжительности выпуска (t_B).

В отдельных случаях целесообразно задавать режим опорожнения не по q_0 и T , а по t_B и T , или проверить приемлемость выбранного режима по q_0 , t_B и T .

Непрерывные, в течение нескольких суток, наблюдения за выпусками на доменных печах, проведенные авторами и выпускниками кафедры, а также обработка данных суточных рапортов о работе доменных печей по заводам страны в различные годы позволили определить величину характеристик режима опорожнения в различных условиях [1, 3].

Полученные данные об условиях и величине основных характеристик режима опорожнения горна доменных печей ММК сведены по группам (табл. 1).

Таблица 1

Изменение характеристик режима выпусков на доменных печах ММК по годам

Год	Массовая скорость, т/мин		Отношение q_n / q_o или t_B / T	Число выпусков N	Продолжительность выпуска t_B , мин	Средняя масса выпуска, т
	накопления q_n	выпуска q_o				
Доменные печи полезным объемом 1180 м ³						
1955	1,28	6,8	0,188	7	38,8	264
1955	1,3	7,9	0,164	7	33,6	266
1956	1,32	6,7	0,197	7	39,0	260
1973	1,67	6,3	0,265	9	33,7	250
1976	1,76	6,4	0,275	10	39,5	252,8
Доменные печи полезным объемом 1370 м ³						
1954	1,38	5,92	0,233	7	47,1	279
1955	1,57	7,68	0,204	7	42,1	323
1962	1,57	8,0	0,20	8	38,0	304
1964	1,62	7,3	0,22	9	35,6	259,5
1975	2,1	6,98	0,30	10	43,2	301,5
1977	2,27	7,18	0,314	10	45,2	324,5
1977	2,18	6,46	0,337	12	40,4	261
1979	2,19	6,76	0,32	12	39,2	265
2002	2,28	4,29	0,53	15	50,1	216
2009	2,26	3,91	0,58	12	57,8	226
Доменные печи полезным объемом 2000 м ³						
1970	2,9	9,3	0,312	12	38	353,4
1972	2,94	9,32	0,315	12	44	410
1975	3,39	7,55	0,46	13	49,6	374,5
1978	3,51	7,45	0,47	14	48,4	380,6
1983	3,60	7,86	0,46	14	46,5	365,5
2009	2,95	5,96	0,49	14	49,5	295,5

Данные в табл. 1 приведены в хронологическом порядке – по годам. Число выпусков на доменных печах увеличивали с течением времени, поэтому данные в таблице фактически расположились в порядке возрастания частоты выпусков.

Независимо от полезного объема печи выявились сходные тенденции в изменении характера режима опорожнения. Они выражались в следующем. Постоянно возрастала производительность доменных печей, что заставляло технологов увеличивать число выпусков. В результате увеличилась доля продолжительности выпуска в цикле. Абсолютная величина продол-

жительности выпуска изменялась сравнительно мало, так как массовая скорость выхода чугуна q_o несколько падала (с 7-8 до 6-7 т/мин на доменных печах объемом 1180-1370 м³ и с 9-10 до 7-8 т/мин на доменных печах объемом 2000 м³). Таким образом, уменьшение количества чугуна, накапливаемого перед выпуском, достигалось на ММК в основном за счет уменьшения интервала времени между выпусками.

Подобная картина имела место на доменных печах других заводов страны, например на доменных печах ЧерМК (табл. 2).

Таблица 2

Изменение характеристик режима выпусков на доменных печах ЧерМК («Северсталь»)

Год	Массовая скорость, т/мин		Отношение q_n / q_o или t_B / T	Число выпусков N	Продолжительность выпуска, мин	Средняя масса выпуска, т
	накопления q_n	выпуска q_o				
Доменные печи полезным объемом 2000 м ³						
1972	3,24	7,25	0,442	12	52,7	348
1972	3,33	7,41	0,45	15	42,6	317
1978	3,24	7,0	0,46	15	44,5	310
1982	3,45	6,26	0,548	18	43,6	273
2004	3,39	4,45	0,548	18	66	275
Доменные печи полезным объемом 2700 м ³						
1972	4,08	6,45	0,484	15	46,9	387,4
1974	4,18	8,68	0,482	15	45,9	399,3
1978	4,42	7,59	0,583	18	45,8	348
1980	4,23	7,08	0,60	18	47,9	339,5
Доменная печь полезным объемом 5580 м ³						
2004	7,11	7,51	0,944	18	93,5	662,5

На многих доменных печах зарубежных заводов, а также на большинстве доменных печах большого объема в нашей стране (ЗСМК, НЛМК) реализуется другой путь уменьшения массы чугуна в горне перед выпуском – уменьшение массовой скорости выпуска чугуна (табл. 3).

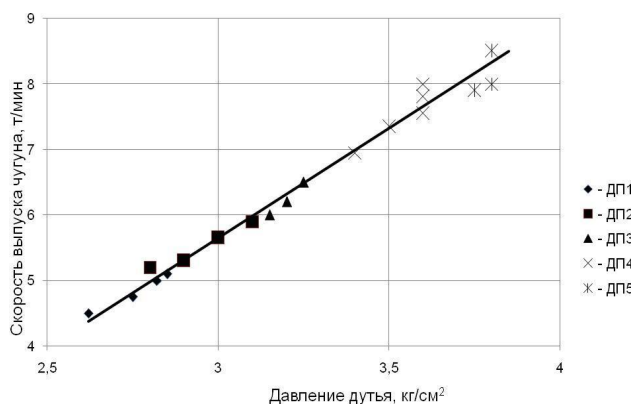
Как видно из данных табл. 3, на ряде доменных печей большого объема скорости истечения уменьшены до 4-5 т/мин. Это привело к увеличению длительности выпуска на одну летку до 100-130 мин. Применение таких режимов стало возможным в связи с уменьшением диаметра пробуриваемого канала летки и использованием безводной леточной массы. Скорость выпуска является функцией давления газов в горне (см. рисунок) [4], а также длины канала (l) и его диаметра (d).

Значительное влияние на режим выпусков оказывает и тот факт, что при переходе на заливные желоба в несколько раз возросло время полного ремонта желоба (~ до 4,5–7 сут), в течение которого, естественно, летка исключается из работы. Это неминуемо приведет в той или иной степени к развитию окружающей неравномерности газового потока, особенно на печах большого объема (полезным объемом более 2000 м³). В некоторой степени это неблагоприятное воздействие компенсируется современной тенденцией работы на «сухих» горнах, что позволяет поддерживать достаточное расстояние между горизонтом воздушных фурм и поверхностью раздела «газ-шлак» для обеспечения удовлетворительного распределения газов по горизонтальному сечению горна. Очевидно, что снижению уровня расплавов в горне и его постоянству способствует приближение скорости опорожнения горна (q_0) к скорости накопления (q_H).

Оба направления в изменении режима опорожнения горна (как увеличение числа выпусков при постоянной q_0 , так и продолжительности выпуска при уменьшении q_0) уменьшают интервал времени между выпусками. Поэтому их влияние на ход доменного процесса, в основном, одинаковое.

Оба эти направления в изменении режима ведут к различным внешним последствиям: изменению стойкости канала чугунной летки и желобов. Режимы быстрого и медленного опорожнения различаются числом открываний и закрытий чугунных леток, потерями на скрап, расходом запорочных материалов,

выносом коксовой мелочи, затратами труда и другими последствиями. Преимуществами выпуска чугуна с невысокими скоростями являются: снижение износа главного желоба в месте падения струи чугуна, снижение числа возмущений хода доменной плавки при колебаниях уровня продуктов плавки в горне.



Зависимость скорости выпуска чугуна от давления дутья на доменных печах заводов Fukujama, Япония [4]

Выпуск чугуна заканчивается продувкой чугунной летки горновым газом и заполнением её канала леточной массой. Продувка необходима, чтобы убедиться в достаточной полной выдаче чугуна и шлака из печи. Регулярная продувка летки повышает температуру слоя кокса в секторах чугунных леток, в результате в этой области растет подвижность шлака, лучше идут процессы обессеривания [5]. Но должно быть четко определено время продувки, так как кроме положительного влияния продувка оказывает и негативное.

Отрицательными являются следующие явления: потери тепла и восстановителей с горновыми газами, загрязнение атмосферы, рост потерь металла со шлаком [5]. По химическому составу капли чугуна крупнее двух миллиметров из шлакового желоба близки к химическому составу брызг чугуна такого же размера, выносимых горновым газом. Это свидетельствует о существенном влиянии на величину потерь металла со шлаком, особенно значительных при длительной продувке летки, когда поток брызг достигает скиммера [5]. Следовательно, при нормальном ходе доменной плавки время продувки (t_{np}) необходимо строго регламентировать – ограничить одной - двумя минутами.

Таблица 3

Характеристики режима выпусков на доменных печах с пониженной скоростью выхода чугуна

Доменная печь		Завод, город, страна	Массовая скорость, т/мин		Отношение q_H/q_0	Число выпусков	Продолжительность выпуска, мин
Номер	Объем, м ³		накопления	выпуска			
1	2323	Фукуяма, Япония	3,57	4,03	0,885	9-10	129
2	2828	То же	4,03	4,86	0,830	11	110
3	3016	То же	4,84	5,55	0,872	11	114
3	1040	Дортмунд, ФРГ	2,78	4,5	0,618	8	100
7	2215	Вестфаленхютте, ФРГ	2,92	4,5	0,649	8	120
	2490	Фос-сюр-Мер, Франция	3,71	5	0,743	10-11	100
1	3000	ЗСМК	4,1	5,53	0,742	10-12	80-100
6	3200	НЛМК	4,75	6,32	0,753	13	66,3

В связи с наличием трех-четырех леток на мощных доменных печах и возможностью совместного выпуска через две, а то и через три летки одновременно (что может применяться при ликвидации расстройств хода печи), как еще один параметр режима выпусков предлагаем учитывать *совместное время выпуска чугуна - тсовм*. Примером является принятый режим выпусков жидких продуктов плавки доменной печи № 2 в Швельгерне одновременно на две летки [6], при котором заметно улучшилось качество чугуна по содержанию серы (среднее содержание [S] составило 0,030 против 0,037% при выпуске на одну летку, количество выпусков с содержанием серы > 0,040 % сократилось вдвое).

Заключение

Анализ данных о влиянии произошедших за последние 20 лет технических достижений позволяет рекомендовать выбирать режим выпусков таким образом, чтобы увеличить продолжительность каждого выпуска за счет уменьшения его массовой скорости. Это поможет сократить число возмущений хода доменной плавки, снизить трудоемкость горновых работ и будет способствовать уменьшению содержания серы в чугуне, вредных выбросов в атмосферу.

Список литературы

1. Кропотов В.К., Монетов Г.В. К вопросу об оптимальных режимах выпуска чугуна и условиях их реализации // Производство чугуна: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГМИ, 1974. С.8–10.
2. Измерение фактического давления шихты на горизонте воздушных фурм доменной печи / Г.А.Воловик, Б.В. Боклан, В.И. Бондаренко и

др. // Доменное производство: темат.отрасл.сб. / МЧМ СССР. М.: Металлургия, 1975. Вып. 2. С. 75–77.

3. Прохоров И.Е., Кропотов В.К. Анализ возможности использования в доменной плавке железорудного сырья, приводящего к нарушению дренажной способности горна доменных печей: отчет о НИР по гранту PD 02-2.9.-31. № ГР 01040001791. Магнитогорск, 2004. 166 с.
4. Higuchi M, Iizuka M, Shibuya T. High top pressure operation of Blast furnaces at Nippon Kokan KK // Journal of the Iron and Steel Institute. September, 1973. P. 1–12.
5. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ им.Г.И. Носова, 2009. 257 с.
6. Повышение производительности доменных печей / Хартинг В., Лангер К., Люнген Г.Б., Штрикер К.П. // Черные металлы. 1996. № 12. С.17–25.

Bibliography

1. Kropotov V.K., Monetov G.V. On the question of optimal modes of iron discharge and the conditions for their implementation. // "Production of pig iron" Interuniversity collection of scientific treatises. / Magnitogorsk: MGMI, 1974. P.8-10.
2. Volovik G.A., Boklan B.V., Bondarenko V.I. and others. Measuring of the actual burden pressure at the level of blast furnace tuyeres. // "Blast-furnace production": The thematic industry publication. MFM of the USSR. Moscow: Metallurgies, 1975. Issue 2. P.75-77.
3. Prokhorov I.E., Kropotov V.K. Analysis of processing in blast furnace of iron ore that result to violation of drainage ability of the blast furnace hearth. // Report on research grant PD 02-2.9.-31. State reg. No. 01040001791, Magnitogorsk, 2004. 166 p.
4. Higuchi M, Iizuka M, Shibuya T. High top pressure operation of Blast furnaces at Nippon Kokan KK // Journal of the Iron and Steel Institute. September 1973. P. 1-12.
5. Babarykin N.N. Theory and technology of the blast furnace process: the manual. /Magnitogorsk: SEI HPE MGTU named after G.I. Nosov, 2009. 257p.
6. Harting V., Langer K., Lungen G.B., Shtriker K.P. Increasing of blast furnaces productivity. // Ferrous metals. 1996. No.12. P.17-25.