

Разработка способа производства горячего восстановительного газа и технологии доменной плавки с его использованием



В. В. Кочура,
доцент кафедры металлургии¹,
зав. кафедрой
рудно-термических
процессов и малоотходных
технологий², канд. техн. наук,
эл. почта: v.v.kochura@bk.ru



Р. В. Куртенков,
доцент кафедры
металлургии¹, канд. техн. наук,
эл. почта:
kurtenkov_rv@pers.spmi.ru

Рассмотрены возможность развития энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий в области металлургии черных и цветных металлов, а также вопросы снижения экологической нагрузки на окружающую среду. В результате выполненных исследований предложен способ проведения доменной плавки с вдуванием синтетического горячего восстановительного газа (ГВГ), полученного из доменного газа и недефицитных и относительно недорогих углей. Совместное вдувание в горн пылеугольного топлива (ПУТ) (120–138 кг/т чугуна) и ГВГ (300–550 м³/т чугуна) позволит снизить расход скипового кокса на 17–36 % (до 288–322 кг/т чугуна). Расход условного топлива (у.т.) из дефицитных энергоресурсов (кокс + ПУТ) составит 458–482 кг/т чугуна. Повышение расхода вдуваемого ГВГ до 600–900 м³/т чугуна снижает расход скипового кокса до 350–388 кг/т чугуна (68–105 кг/т чугуна; 15–21 %) и расход условного топлива из дефицитных энергоносителей (кокса) до 388–426 кг/т чугуна (154–191 кг/т чугуна; 26–33 %), что соответствует лучшим мировым аналогам при выплавке чугуна. Использование полученного из доменного газа ГВГ в качестве восстановительного при производстве чугуна позволит существенно повысить показатели доменной плавки, снизить выбросы CO₂ в атмосферу и улучшить экологическую обстановку в металлургических регионах страны.

Ключевые слова: кокс, природный газ, пылеугольное топливо, горячий восстановительный газ, чугун, производительность, доменная печь.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.03

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

²Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия.

Введение

Значительная ресурсоемкость металлургической промышленности, а также рост цен на сырьевые и энергетические ресурсы обуславливают необходимость модернизации и увеличения эффективности на всех стадиях производства от разведки и добычи до переработки и получения готовой продукции, что позволит предприятиям занять лидирующие позиции в промышленности [1–3]. Одним из путей решения данного вопроса является переориентация металлургических предприятий на внутренний рынок, освоение комплексных технологий, производство новых видов продукции и снижение энергозатрат производства в целом [4, 5]. В связи с чем перед руководителями и учеными ставятся новые перспективные задачи [6, 7].

Развитием тематики и исследованиями в области повышения эффективности технологий и комплексности использования сырья в производстве металлов занимались многие ученые, в том числе и Горного университета [8–10], при этом большой интерес вызывают работы, направленные на возможность повышения эффективности основного металлургического оборудования [11, 12].

Известно, что для производства чугуна используют дефицитные, дорогостоящие и невозобновляемые энергоносители, что в значительной степени определяет высокую стоимость чугуна и значительный расход условного топлива, равный 500–600 кг/т чугуна [13–15]. В современной доменной технологии в технологическом процессе вторичный углерод доменного газа больше не используют в качестве восстановителя, а применяют в основном для нагрева дутья в воздухонагревателях. При этом существует много примеров многократного повторного использования первичных ресурсов. Так, при производстве металлизированных окатышей в печах Midrex в качестве окислителя природного газа в реформере применяют углекислый газ и водяной пар, содержащиеся в очищенном от пыли колошниковом газе, что позволяет вторично использовать восстановители, содержащиеся в очищенном газе и таким образом снижать потребность в природном газе для конверсии [16]. Решение этой задачи в доменном производстве весьма перспективно и может обеспечить существенное повышение энергоэффективности технологии.

В целях повышения эффективности производства чугуна в мировой черной металлургии проводятся исследования

и промышленные испытания различных ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих снижение использования первородных и дорогих энергоресурсов, одной из которых является рециклинг доменного газа после его очистки от углекислого газа. Предложены варианты вдувания очищенного газа в горн или шахту доменной печи [17–19]. В данных исследованиях не предусмотрено использование в технологическом процессе доменной плавки выделенного при очистке CO_2 .

На производстве НПО «Тулачермет» в 1985–1990 гг. был построен опытно-промышленный комплекс для получения горячего восстановительного газа (ГВГ) и вдувания его в доменную печь № 2. Доменный газ очищали от пыли, затем путем химической абсорбции от CO_2 нагревали в воздухонагревателях доменной печи и вдували в печь через фурмы вместо горячего дутья. Во время эксплуатации доменной печи в опытно-промышленном режиме при вдувании ГВГ выплавлено около 250 тыс. т чугуна, расход кокса сократился от 606 до 353 кг/т чугуна (58 %); суточная производительность доменной печи возросла от 1067 до 1800 т/сут чугуна (68,7 %), улучшились экологические показатели [20]. Дальнейшее внедрение данной технологии сдерживается низким уровнем техники и технологии смежных с металлургией отраслей.

В ЦНИИчермет им. И. П. Бардина разработана технология рециклинга доменного газа и вдувания его в доменную печь, позволяющая снизить расход кокса на 30–40 %, вывести из доменной плавки природный газ (ПГ), снизить себестоимость чугуна на 12–15 %, повысить производительность доменной печи на 25–30 % и сократить выбросы CO_2 на 40–50 % [21].

Аналогичные промышленные эксперименты проводили консорциумом крупнейших металлургических корпораций и научно-исследовательских институтов на опытно-промышленной доменной печи (программа ULCOS) с целью снижения выбросов CO_2 . Достигнута экономия кокса и снижение выбросов углекислого газа до 35 % [22, 23].

Анализ литературных источников показал, что использование энергоресурсов в доменном производстве, в первую очередь доменного газа, является важным и перспективным направлением развития отрасли и повышения эффективности технологии производства черных металлов [24].

Целью данной статьи является разработка способа производства ГВГ из доменного газа и технологии доменной плавки с его использованием.

Материалы и методика исследования

Синтез и ввод ГВГ в доменную печь

Из образующегося при выплавке чугуна в доменной печи колошникового газа в скрубберах высокого давления извлекают диоксид углерода [25, 26] и на его основе при последующей газификации угля по реакции Белла – Будара [27, 28] получают восстановительный газ — оксид углерода температурой 500–1000 °С, который через воздушные фурмы вводят в доменную печь, заменяя часть восстановительного газа, получаемого в горне доменной печи из кокса, пылеугольного топлива (ПУТ) и других энергоносителей. При выплавке 1 т чугуна может быть получено до 900 м³ CO (ГВГ)

в зависимости от количества и состава доменного газа и процессов очистки и газификации угля.

Оставшийся после извлечения диоксида углерода доменный газ, содержащий CO , H_2 и N_2 повышенной калорийности, направляют на нагрев дутья в воздухонагревателях и другим потребителям.

Схема получения ГВГ из доменного газа и вдувания его в горн печи представлена на **рис. 1**.

Такая организация технологического процесса позволяет усовершенствовать технологию проведения плавки в доменной печи, снизить себестоимость готовой продукции за счет использования синтетического ГВГ, полученного в основном из доменного газа и относительно недорогих недефицитных углей, а также снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу. Подробно реализация данного способа изложена в работе [29]. Получение ГВГ (100 % CO) основано на выделении его из доменного газа CO_2 в скрубберах высокого давления и взаимодействии его в газификаторе с углеродом угля в массовом соотношении 3,67:1.

В настоящее время этот вид топлива представляется наиболее перспективным для выплавки чугуна, поскольку производится из вторичных энергоресурсов.

Расчет показателей доменной плавки с использованием ГВГ

Показатели доменной плавки рассчитаны с использованием метода профессора Ленинградского политехнического института А. Н. Рамма [30] и метода полной и комплексной компенсации негативных изменений технологического режима и определяющих показателей для наивысшей эффективности плавки профессора Донецкого национального технического университета С. Л. Ярошевского [31, 32].

Режимы работы доменной печи рассчитаны в зависимости от расхода ГВГ, ПУТ, температуры дутья и кислорода*.

В качестве базового периода расчета (режим 1) принята работа доменной печи № 5 Енакиевского металлургического

* Расчеты выполнены с участием старшего преподавателя кафедры рудно-термических процессов и малоотходных технологий Донецкого национального технического университета З. К. Афанасьевой.

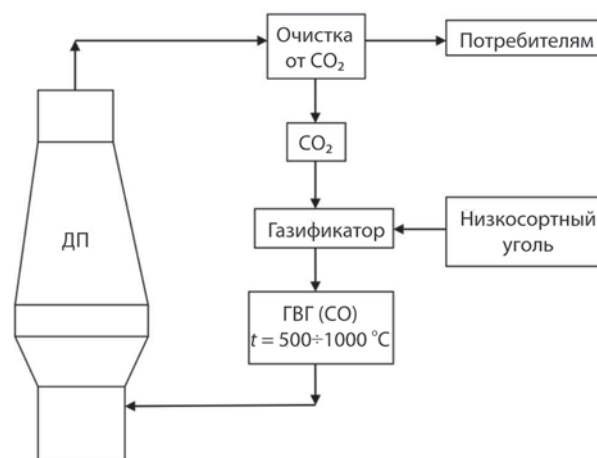


Рис. 1. Схема получения ГВГ и вдувания его в доменную печь

завода (ЕМЗ) (полезный объем 1517 м³): производительность 2981 т/сут; расход скипового кокса 455,7 кг/т чугуна; коксового орешка 35,1 кг/т чугуна; природного газа 71,8 м³/т чугуна; в железорудной шихте доменной печи содержится 51 % агломерата и 49 % окатышей.

В расчетах приняты следующие допущения. Извлеченный из колошникового газа в скрубберах СО₂ имеет 100%-ную чистоту. Полученный в газификаторе из диоксида углерода и угля, горячий восстановительный газ СО имеет 100%-ую чистоту. Для получения 1000 м³ СО по реакции Белла – Будуара требуется 500 м³ СО₂ и 268 кг углерода угля или 383 кг угля с содержанием углерода до 70 %. Стоимость колошникового газа на Енакиевском металлургическом заводе составляет 227 руб/1000 м³. Стоимость выделенного из колошникового газа диоксида углерода принята 950 руб/1000 м³. Стоимость донецкого угля для процесса газификации — 2000 руб/т. Таким образом, стоимость ГВГ составит 1240 руб/100 м³, кокса — 10090 руб/т, ПГ — 10500 руб/1000 м³.

Результаты исследования и их обсуждение

Вдувание ГВГ

В табл. 1 представлено влияние расхода вдуваемого ГВГ на основные показатели доменной плавки.

В качестве компенсирующих мероприятий при вдувании ГВГ использовали: вывод ПГ из состава дутья; повышение температуры дутья до 1250 °С (с использованием воздухонагревателей Калугина); увеличение доли окатышей в шихте до 78 %; снижение расхода конвертерного шлака до 40 кг/т чугуна (базовый расчетный режим 5).

Выполнили серию расчетов по оценке влияния ГВГ температурой 1000 °С на показатели доменной плавки. Расчетные показатели работы доменной печи при вдувании ГВГ представлены режимами 6–15 в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что при повышении расхода ГВГ снижаются расход кокса, производительность доменной печи и теоретическая температура горения. Коэффициент замены кокса ГВГ не превышает 0,2 кг/м³, причем с увеличением расхода вдуваемого ГВГ до 1000 м³/т чугуна он снижается до 0,172 кг/м³. С ростом расхода ГВГ на 100 м³/т чугуна теоретическая температура горения снижается в среднем на 70 °С в диапазоне расхода ГВГ 100–1000 м³/т чугуна.

Повышение расхода ГВГ свыше 600 м³/т чугуна характеризуется нежелательным снижением теоретической температуры горения, а также значительным снижением производительности печи. При расходах ГВГ ниже 500 м³/т наблюдается рост теоретической температуры горения.

На основании промышленного опыта и расчетов известно, что по мере увеличения расхода дополнительных топлив при различных режимах доменной плавки теоретическая температура должна сохраняться на базовом уровне. Поэтому рекомендуемыми на практике являются варианты 10–11 (см. табл. 1) с расходом ГВГ 500–600 м³/т чугуна и теоретической температурой горения 2013–2083 °С, при которых снижение расхода кокса составляет 92,6–109,5 кг/т чугуна (19–22 %).

Вдувание ГВГ характеризуется прежде всего качественным изменением расхода и состава горновых газов. По сравнению

с базовым расчетным периодом содержание СО в горновом газе в вариантах 10–11 повысилось с 26,24 до 36,35–38,94 % (об.). При этом выход восстановительного газа также увеличился на 380–458 м³/т (38,2–42,7 % (об.)). Указанные изменения происходят в основном за счет сокращения расхода дутья на 252–298 м³/т чугуна (19,6–23,1 % (об.)) и соответственного поступления азота в горн печи, что свидетельствует о качественном улучшении условий восстановления оксидов железа газообразным восстановителем.

Ввод в доменную печь ГВГ 500–600 м³/т чугуна интенсифицирует процесс восстановления оксида железа в горне с выделением тепла. Данное изменение, так же, как и снижение выхода шлака и другие изменения, определяет снижение расхода кокса.

Вдувание смеси дополнительных топлив: ГВГ и ПУТ

Для реализации технологии вдувания ГВГ выполнены расчеты доменной плавки с вдуванием ГВГ и совместном вдувании ГВГ и ПУТ при повышении содержания кислорода в дутье до 40 %. Расчетные показатели работы доменной печи при вдувании ГВГ представлены режимами 3–8 в табл. 2.

С целью повышения достоверности расчета и оценки возможности реализации расчетных технологических режимов с вдуванием дополнительных топлив учтены определяющие параметры, превышение которых маловероятно в реальных сложившихся условиях [32]. В диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна предельными значениями определяющих показателей являются: скорость газа в распаре (20 м/с); выход горнового газа (4,5 тыс. м³/т кокса); количество мелочи 5–0 мм в железорудной шихте (400 кг/т кокса); выход шлака (1100 кг/т кокса). Указанные значения определяющих параметров рассматривают как граничные, предельные, разделяющие области реально достижимых и маловероятных режимов доменной плавки.

В режимах 4, 6, 7 рассчитаны показатели доменной плавки при вдувании смеси дополнительных топлив ГВГ и ПУТ при различном содержании кислорода в дутье. В качестве ПУТ использовали кузнецкий слабоспекающийся уголь марки СС, %: 7,04 зола, 0,19 S, 20,71 летучие, 6,87 влага.

Изучены показатели доменной плавки при вдувании в горн смеси ГВГ (300–550 м³/т чугуна) и ПУТ (120–138 кг/т чугуна) при обогащении дутья кислородом (22,8–35 %).

Расчеты показали высокую эффективность совместного вдувания ГВГ и ПУТ. Достигнуто снижение расхода кокса до 288–322 кг/т чугуна (127–168 кг/т чугуна; 27–36 %), расхода условного топлива (кокс + ПУТ) на 17–20 %. Графическая обработка полученных результатов расчета представлена на рис. 2–4.

Оптимальным на данном этапе является режим 4, характеризующийся следующими показателями: расход ГВГ — 300 м³/т чугуна; ПУТ — 120 кг/т чугуна; кокс — 323 кг/т чугуна (–133 кг/т чугуна; –29 %); условное топливо из дефицитных энергоресурсов (кокс и ПУТ) — 482 кг/т чугуна (–94 кг/т чугуна; –16 %); снижение себестоимости 336 руб/т чугуна. Производительность печи при этом незначительно снизилась.

Указанные режимы достаточно эффективны и по многим показателям превышают показатели доменной плавки с вдуванием ПУТ [33]. Однако рекомендуемые угли для

Таблица 1

Основные показатели работы доменной печи при вдувании ГВГ

Показатель	База	Вывод ПГ	Повышение температуры дутья	Повышение доли окатышей	Снижение конвертерного шлака	Вдувание ГВГ, м ³ /т чугуна									
						100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Производительность печи, %	100,0	101,2	104,5	103,1	102,8	101,5	100,2	98,8	97,3	95,8	94,3	92,8	91,2	89,6	88,0
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	455,7	514,1	490,1	496,6	497,0	477,3	458,2	439,7	421,7	404,4	387,5	371,1	355,2	339,8	324,8
Коксовый орешек, кг/т чугуна	35,1														
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	490,8	549,2	525,2	531,7	532,1	512,4	493,3	474,8	456,8	439,5	422,6	406,2	390,3	374,9	359,9
Коэффициент замены кокса ГВГ, кг/м ³		0,8				0,197	0,194	0,191	0,188	0,185	0,183	0,180	0,177	0,175	0,172
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна		794				330									
Окатыши Госрезерв, кг/т чугуна		748,9				1162									
Конвертерный шлак, кг/т чугуна		65,6				40									
Известняк обычный, кг/т чугуна	6,9	11,2	9,4	77,0	93,9	92,4	91,0	89,7	88,3	87,1	85,8	84,6	83,4	82,3	81,2
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1406	1355	1265	1288	1289	1236	1184	1134	1085	1037	991	946	901	859	817
Температура дутья, °С	1100	1100	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	71,8	-													
Содержание кислорода в дутье, %	22,8														
Выход сухого колошникового газа, м ³ /т чугуна	1914	1849	1739	1781	1787	1816	1846	1878	1912	1948	1985	2024	2064	2106	2150
Состав колошникового газа, %															
CO ₂	15,66	19,21	20,23	21,04	21,19	21,40	21,55	21,64	21,67	21,67	21,62	21,54	21,42	21,28	21,11
CO	24,75	23,65	23,11	22,68	22,64	25,45	28,23	30,99	33,69	36,35	38,94	41,46	43,92	46,30	48,60
H ₂	2,75	0,41	0,33	0,30	0,30	0,40	0,47	0,52	0,56	0,58	0,60	0,61	0,61	0,60	0,60
Степень использования CO, доли	0,402	0,460	0,479	0,484	0,484	0,458	0,435	0,413	0,394	0,377	0,361	0,346	0,333	0,320	0,309
Степень прямого восстановления, доли	0,284	0,398	0,407	0,407	0,407	0,388	0,371	0,354	0,338	0,323	0,309	0,295	0,281	0,269	0,257
Выход восстановительных газов, м ³ /т чугуна	816	645	602	613	614	688	764	840	917	994	1072	1150	1229	1309	1389
Выход шлака, кг/т чугуна	311	320	316	314	305	302	299	296	294	291	288	286	283	281	279
Теоретическая температура горения, °С	2092	2375	2487	2487	2487	2399	2315	2234	2157	2083	2013	1946	1882	1822	1765

Таблица 2

Основные показатели режимов работы доменной печи при вдувании ПГ, ГВГ и ПУТ

Показатель	Режимы работы доменной печи							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Производительность печи, %	100	102,8	94,3	95,9	100,8	102,3	105,5	105,1
Кокс сухой скиповой, кг/т чугуна	455,7	497	387,5	322,9	369,4	299,1	287,6	350,3
Коксовый орешек, кг/т чугуна	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1
Сумма кокса и коксового орешка, кг/т чугуна	490,8	532,1	422,6	358	404,5	334,2	322,7	385,4
Замена скипового кокса доп. топливом, %	–	–	22,03	35,03	25,67	39,82	42,13	29,52
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	71,8	–	–	–	–	–	–	–
Расход ГВГ, м³/т чугуна	–	–	600	300	750	500	550	900
ПУТ, кг/т чугуна	–	–	–	120	–	120	138	–
Всего углерода, кг/т чугуна	460,55	457,61	684,86	561,59	749,66	648,27	679,11	813,59
В том числе углерод ГВГ, кг/т чугуна	–	–	321,42	160,72	401,78	267,86	294,64	482,14
углерод угля для получения ГВГ, кг/т чугуна	–	–	160,71	80,36	200,89	133,93	147,32	241,07
углерод СО ₂ для получения ГВГ, кг/т чугуна	–	–	160,71	80,36	200,89	133,93	147,32	241,07
Доля вторичного углерода, %	–	–	23,47	14,31	26,80	20,66	21,69	29,63
Агломерат ЕМЗ, кг/т чугуна	794	330	330	330	330	330	330	330
Окатыши Госрезерв, кг/т чугуна	748,9	1169	1169	1169	1169	1169	1169	1169
Конвертерный шлак, кг/т чугуна	65,6	40	40	40	40	40	40	40
Известняк обычный, кг/т чугуна	6,9	93,9	85,8	86,2	85,2	84,5	84	83,8
Расход сухого дутья, м ³ /т чугуна	1406	1289	991	1125	719	809	690	509
Температура дутья, °С	1100	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Содержание кислорода в дутье, %	22,8	22,8	22,8	22,8	30	30	35	40
Состав колошникового газа, м ³ /т чугуна, в том числе СО ₂								
СО	15,66	21,19	21,62	20,92	23,9	23,61	24,74	25,5
СО	24,75	22,64	38,94	31,07	47,8	41,61	45,81	56,07
Выход шлака, кг/т чугуна	311	305	288	290	286,5	287	282	284
Теоретическая температура горения, °С	2092	2487	2013	2044	2017	2028	2024	2014
Расход условного топлива, кг/т чугуна	579	536	684	611	731	674	701	755
Расход условного дефицитного топлива, кг/т чугуна	579	536	426	482	407	458	464	388
Определяющие показатели:								
рудная нагрузка, т/т кокса	3,31	2,92	3,68	4,34	3,84	4,65	4,82	4,03
выход шлака, кг/т кокса	634	573	682	810	709	857	876	736
выход горнового газа, м ³ /т кокса	3875	3023	4346	4977	4204	4925	4913	4081
приход мелочи (0–5 мм) с шихтой, кг/т кокса	181	122	154	181	161	194	201	168
скорость газа в распаре, м/с	9,65	7,92	10,61	15,05	11,18	18,26	20	11,64

приготовления ПУТ являются невозобновляемым ресурсом. Поэтому в перспективе с целью обеспечения устойчивости и эффективности производства следует ориентироваться на использование более доступных дешевых энергоносителей.

Вдувание ГВГ при повышении содержания кислорода в дутье

Выполнен анализ показателей доменной плавки при вдувании ГВГ при различном содержании кислорода в дутье (режимы работы печи 3, 5, 8, см. табл. 2). Необходимо отметить,

что применение ГВГ характеризуется отсутствием вредных примесей, в том числе азота, невысокой стоимостью, нагревом до 500–1000 °С и другими преимуществами.

Ввод в горн печи ГВГ в количестве 600–900 м³/т чугуна позволяет снизить расход кокса до 350–388 кг/т чугуна (68–105 кг/т чугуна; 15–21 %), что соответствует концепции снижения углеродного следа. При этом расход дефицитного условного топлива (из невозобновляемых ресурсов) снижается до 388–426 кг/т чугуна (на 154–191 кг/т чугуна; 27–33 %), что является сопоставимым уровнем с лучшими мировыми

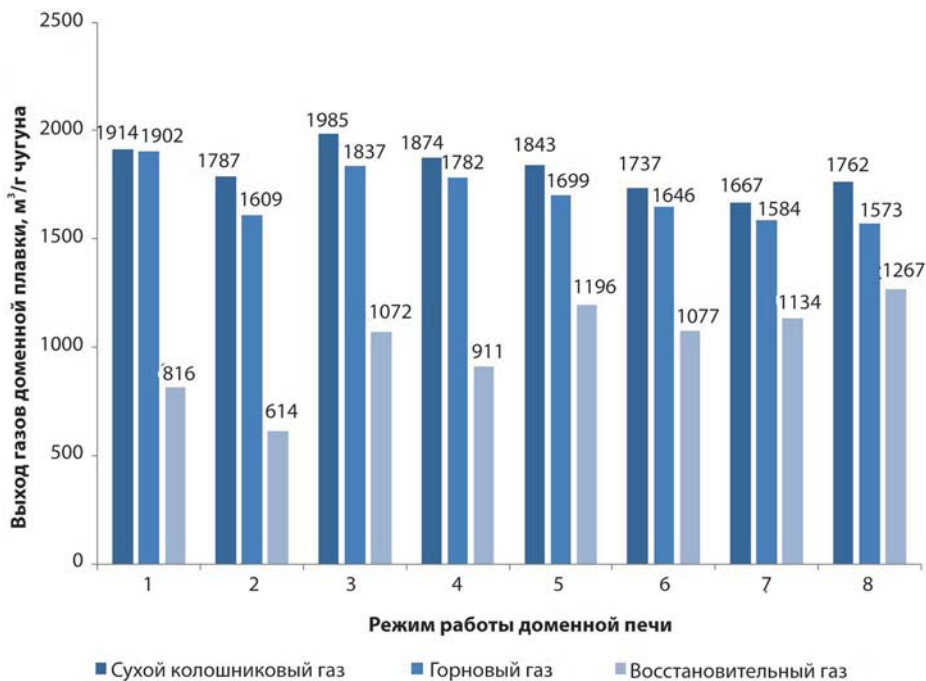


Рис. 2. Влияние параметров доменной плавки на выход основных газов процесса

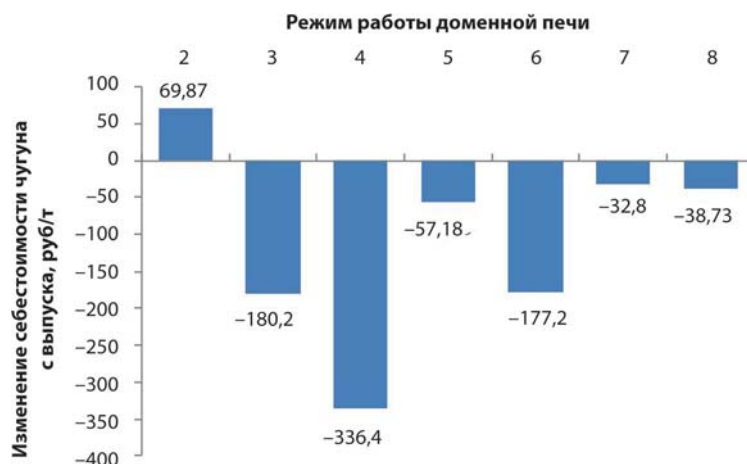


Рис. 3. Влияние параметров доменной плавки на выход основных газов процесса

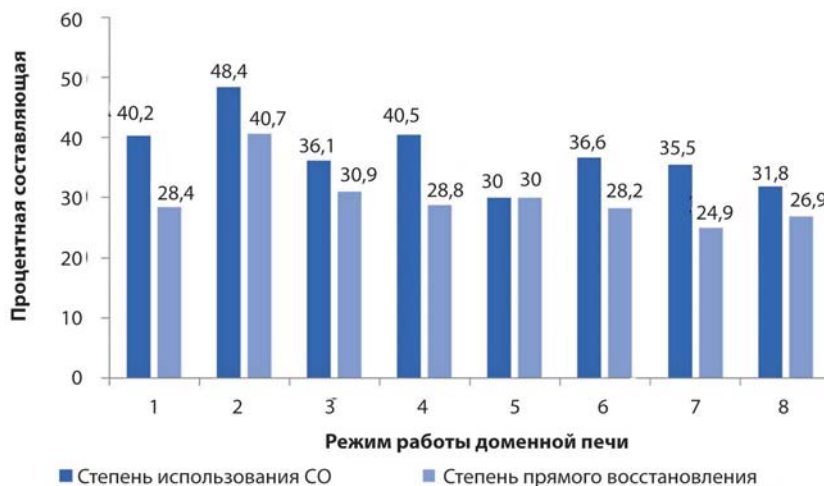


Рис. 4. Зависимость степени использования окиси углерода и степени прямого восстановления от выбранного режима работы доменной печи

показателями при выплавке чугуна [34–36]. Эффективным является режим 3 (см. табл. 2): расход ГВГ — $600 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; кокса — 388 кг/т чугуна (-68 кг/т чугуна; -15%), условного топлива из невозобновляемых энергоресурсов — 426 кг/т чугуна (-150 кг/т чугуна; -26%); снижение себестоимости — 180 руб/т чугуна (см. рис. 3). Производительность печи при этом незначительно снизилась (см. табл. 2).

Общий расход углерода (см. табл. 2), поступающего в доменную печь при вдувании ГВГ, увеличивается в базовом периоде от 460 до $685\text{--}814 \text{ кг/т}$ чугуна за счет вторичного углерода, содержащегося в ГВГ ($321\text{--}482 \text{ кг/т}$ чугуна; $23\text{--}30 \%$). Повышение расхода углерода вызвано использованием для производства ГВГ углерода из диоксида углерода доменного газа и углерода неспекающихся недорогих углей.

Анализ данных табл. 2 и графического материала позволяет сделать вывод, что при введении в горн ГВГ в количестве $600\text{--}900 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна возможно снизить расход дутья до $509\text{--}991 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна за счет уменьшения расхода кокса.

Эффективное применение ГВГ отмечено при расходах негазифицируемого в печи углерода выше $150\text{--}200 \text{ кг/т}$ чугуна: затраты углерода на науглероживание, прямое восстановление, потери с колошниковым газом и др. Снижение эффективности производства ГВГ отмечено при избытке восстановительного газа (свыше $700\text{--}900 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна) и предельном снижении показателя степени прямого восстановления. Таким образом, рабочий диапазон применения ГВГ составляет $300\text{--}900 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна.

Минимальный расход кокса $200\text{--}250 \text{ кг/т}$ чугуна и значение показателя расхода условного топлива 300 кг/т чугуна и менее могут быть достигнуты при вдувании ГВГ в количестве более $1000 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна в результате компенсирующих мероприятий: повышения качества кокса, в том числе по показателю горячей прочности (более 65%); снижения выхода шлака (250 кг/т чугуна и менее); повышения содержания кислорода в дутье (30% и более); качественного повышения уровня технологического контроля.

Ресурсы применения ГВГ практически не ограничены, так как весь доменный газ можно использовать для производства ГВГ, максимального снижения выброса диоксида углерода в атмосферу и соответственного улучшения экологической обстановки в металлургических регионах страны.

Заключение

1. Предложен способ проведения плавки чугуна в доменной печи с использованием синтетического ГВГ, полученного из доменного газа и недефицитных и относительно недорогих углей. Указанный вид топлива представляет наиболее перспективным для выплавки чугуна, так как производится из вторичных энергоресурсов, содержит минимальное количество вредных примесей (серы, золы, фосфора и др.), является заменителем дефицитных дорогих невозобновляемых энергоносителей, используемых в доменном производстве (кокса, пылеугольного топлива, природного газа, мазута).

2. С использованием методик определения показателей доменной плавки, разработанной профессором Ленинградского политехнического института А. Н. Раммом,

и усовершенствованной для вдувания ПУТ профессором Донецкого национального технического университета С. Л. Ярошевским, выполнены расчеты технологических режимов доменной плавки с вдуванием дополнительных топлив для условий доменной печи № 5 Енакиевского металлургического завода (полезный объем 1517 м^3), работающей на агломерате и окатышах с расходом кокса 456 кг/т чугуна и ПГ $72 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна.

В расчетах в качестве компенсирующих мероприятий использованы: вывод ПГ из состава дутья, повышение температуры дутья до $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, доли окатышей в шихте до 78% , содержания кислорода в дутье до 40% и др.

3. Совместное вдувание в горн доменной печи ПУТ ($120\text{--}138 \text{ кг/т}$ чугуна) и ГВГ ($300\text{--}550 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна) позволяет снизить расход скипового кокса до $288\text{--}323 \text{ кг/т}$ чугуна (на $17\text{--}36 \%$) и условного топлива из дефицитных энергоресурсов (кокс + ПУТ) до $458\text{--}482 \text{ кг/т}$ чугуна (на $17\text{--}20 \%$). Максимальное снижение себестоимости чугуна (на 336 руб/т чугуна) получено при расходах $300 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна ГВГ и 120 кг/т чугуна ПУТ. Расход скипового кокса составил 323 кг/т чугуна (-133 кг/т чугуна; -29%), условного топлива — 482 кг/т чугуна (-94 кг/т чугуна; -16%); производительность печи — 96% .

4. Ввод в горн печи ГВГ в количестве $600\text{--}900 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна снижает расход скипового кокса до $350\text{--}388 \text{ кг/т}$ чугуна (на $68\text{--}105 \text{ кг/т}$ чугуна; $15\text{--}21 \%$). При этом расход условного топлива (кокса) уменьшен до $388\text{--}426 \text{ кг/т}$ чугуна (на $154\text{--}191 \text{ кг/т}$ чугуна; $26\text{--}33 \%$).

Оптимальным при вдувании только ГВГ является расход ГВГ — $600 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; расход скипового кокса — 388 кг/т чугуна, расход условного топлива из дефицитных энергоресурсов (кокса) — 426 кг/т чугуна; производительность печи составила 94% ; снижение себестоимости чугуна — 180 руб/т чугуна.


5. Общий расход углерода, поступающего в доменную печь при вдувании ГВГ, увеличен от 460 в базовом периоде до $685\text{--}814 \text{ кг/т}$ чугуна за счет вторичного углерода, содержащегося в ГВГ ($321\text{--}482 \text{ кг/т}$ чугуна; $23\text{--}30 \%$). Повышение расхода углерода вызвано использованием для производства ГВГ углерода из диоксида углерода, полученного из доменного газа и углерода неспекающихся недорогих углей.

6. Основными достоинствами оптимальных рекомендуемых в данной работе режимов при совместном вдувании ГВГ и ПУТ (режим 3) и одного ГВГ (режим 4) является существенное снижение себестоимости чугуна (на 180 и 336 руб/т чугуна).

Преимуществами технологического режима при совместном вдувании $550 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна ГВГ и 138 кг/т чугуна ПУТ являются: снижение расхода скипового кокса до 288 кг/т чугуна и повышение производительности печи на $5,5 \%$. Указанный расход кокса соответствует лучшим мировым аналогам при выплавке чугуна.

При вдувании $900 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна ГВГ расход дефицитного условного топлива (кокса) составил 388 кг/т чугуна, что также соответствует лучшим мировым значениям данного показателя.

7. Предлагаемый способ производства ГВГ из диоксида углерода использует только $15\text{--}20 \%$ доменного газа. Ресурсы же применения ГВГ практически не ограничены, так как весь

доменный газ может быть использован для производства ГВГ, дальнейшего существенного улучшения показателей доменной плавки, максимального снижения выброса CO₂ в атмосферу и соответственного улучшения экологической обстановки в металлургических регионах страны. 

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 15–22
DOI: 10.17580/chm.2024.09.03

Development of a method for producing hot reducing gas and blast furnace smelting technology therewith

Information about authors

V. V. Kochura, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgy¹, Head of the Dept. of Ore-Thermal Processes and Low-Waste Technologies², e-mail: v.v.kochura@bk.ru;

R. V. Kurtenkov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Metallurgy¹, e-mail: kurtenkov_rv@pers.spmi.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

² Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia.

Abstract: The article is devoted to the topical topic of ferrous metals production, which is a continuation of many scientific works of the Department of Metallurgy, considering the possibility of developing energy-efficient and resource-saving technologies in the field of metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, as well as issues of reducing the environmental burden on the environment. Based on the research performed, a method for carrying out blast furnace smelting with the injection of synthetic hot reducing gas (SHRG) obtained from blast furnace gas and non-scarce and relatively inexpensive coals was proposed. Joint injection of pulverized coal fuel (PCF) into the hearth in an amount of 120–138 kg/t of cast iron and hot gas with a flow rate of 300–550 m³/t of cast iron will reduce the consumption of skip coke to 288–322 kg/t of cast iron (by 17–36 %), consumption of equivalent fuel (ce) from scarce energy resources (coke + pulverized coal) will be 458–482 kg/t of cast iron. Increasing the consumption of injected hot water gas to 600–900 m³/t of cast iron reduces the consumption of skip coke to 350–388 kg/t of cast iron (68–105 kg/t of cast iron; 15–21 %) and the consumption of standard fuel from scarce energy carriers (coke) to 388–426 kg/t of cast iron (154–191 kg/t of cast iron; 26–33 %), which corresponds to the best world analogues in the ironmaking. The use of SHG obtained from blast furnace gas as a reducing gas for the production of pig iron will significantly increase the performance of blast furnace smelting, reduce CO₂ emissions into the atmosphere and improve the environmental situation in the metallurgical regions of the country.

Key words: coke, natural gas, pulverized coal fuel, hot reducing gas, iron, productivity, blast furnace.

References

- Trushko V. L., Trushko O. V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 250 (4). pp. 569–577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.
- Pelevin A. E. Technologies of iron ore beneficiation in Russia and ways to improve their efficiency. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 256. pp. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
- Aleksandrova T. N., Chanturia A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective destruction of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 256. pp. 517–526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58.
- Fokina S. B., Petrov G. V., Sizyakova E. V., Andreev Yu. V. Process solutions of zinc-containing waste disposal in steel industry. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10, Iss. 1. pp. 2083–2089.
- Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilyeva N. A simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part one. Dynamic simulation of technological processes. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, Iss. 22. pp. 1–19. DOI: 10.3390/app112210885.
- Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 338. pp. 130–530. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
- Litvinenko V. S. Correction to: digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29, Iss. 3. pp. 1521–1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
- Kozyrev B. A., Sizyakov V. M., Arsenyev V. A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids. *Non-ferrous Metals*. 2022. Vol. 2. pp. 30–34.
- Lebedev A. B., Musinova P. V. Formation of the strength of pelletized multiphase dicalcium silicate sinter. *Chernye Metally*. 2022. No. 5. pp. 40–46.
- Khalifa A. A., Bazhin V. Yu., Ustinova Ya. V., Shalabi M. E. Kh. Study of the kinetic features of the process of obtaining pellets from red mud in a hydrogen flow. *Zapiski Gornogo instituta*. 2022. Vol. 254. pp. 261–270. DOI: 10.31897/PMI.2022.18.
- Feshchenko R. Yu., Erokhina O. O., Litavrin I. O., Ryaboshuk S. V. Improvement of oxidation resistance of arc furnace graphite electrodes. *Chernye Metally*. 2023. No. 7. pp. 31–36.

Библиографический список

См. англ. блок

- Bazhin V. Yu. Structural modification of petroleum needle coke by adding lithium on calcining. *Coke and Chemistry*. 2015. Vol. 58. No. 4. pp. 138–142. DOI: 10.3103/S1068364X15040043.
- Tovarovsky I. G. Understanding the processes and development of blast furnace smelting technology: Monograph. Dnepropetrovsk: ZhURFOND. 2015. 912 p.
- Shatohka V. The Sustainability of the iron and steel industries in Ukraine: Challenges and opportunities. *J. Sustain. Metall.* 2016. No. 2. pp. 106–115. DOI: 10.1007/s40831-015-0036-2.
- Yaroshevsky S. L., Kochura V. V., Kuznetsov A. M. et al. Efficiency and resources of pulverized coal technology for iron smelting. *Metall i lityu Ukrainy*. 2018. No. 9–10. pp. 5–19.
- Zinyagin G. A., Dorofeev G. A. Production technology and quality of direct reduced iron. *Clean steel: from ore to rolled products-2020: collection of articles of the 1st International Conference*. Moscow, 2020. pp. 11–59.
- Zhang W., Zhang J., Xue Z. et al. Unsteady analyses of the top gas recycling oxygen blast furnace. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, Iss. 8. pp. 1358–1367. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2016-090.
- Helle M., Saxen H. Operation windows of the oxygen blast furnace with top gas recycling. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, Iss. 10. pp. 2047–2055. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2015-083.
- Ariyama T., Sato M., Nouchi T., Takahashi K. Evolution of blast furnace process toward reductant flexibility and carbon dioxide mitigation in steel Works. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56, Iss. 10. pp. 1681–1696. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2016-210.
- Shevelev L. N., Brodov A. A. Energy saving, increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions in the ferrous metallurgy of Russia. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2018. No. 2. pp. 3–6.
- Quader A., Shamsuddin A., Dawal S. Z., Nukman Y. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide (CO₂) steelmaking (ULCOS) program. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 55. pp. 537–549. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.101.
- Jahanshahi S., Mathieson J. G., Reimink H. Low emission steelmaking. *Journal of sustainable metallurgy*. 2016. Vol. 3. pp. 185–190.
- Novitsky E. G., Bazhenov S. D., Volkov A. V. Optimization of methods for cleaning gas mixtures from carbon dioxide (review). *Neftekhimiya*. 2021. Vol. 61. No. 3. pp. 291–310. DOI: 10.31857/S0028242121030011.
- Soskovets O. N., Shevelev L. N., Shatlov V. A. et al. Application of the "Hot reducing gases" technology to improve the energy efficiency of iron production. *Stal*. 2014. No. 5. pp. 103–107.
- Bakhronov H. Sh., Akhmatov A. A., Ganieva S. U., Suyarova Kh. Kh. Cleaning of gas emissions from carbon dioxide. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2019. No. 3. pp. 19–23.
- Berdnikov V. I., Gudim Yu. A. Chemical reactions during the reduction of iron from oxides in a carbon monoxide environment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2021. Vol. 64. No. 3. pp. 211–213. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-211-213.
- Tovarovsky I. G., Merkulov A. E. Blast furnace smelting with injection of coal gasification products. Kiev: Naukova dumka, 2016. 200 p.
- Kozlov A. N. Review of modern trends in the development of solid fuel gasification technologies. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*. 2021. No. 1. pp. 130–148.
- Yaroshevsky S. L., Kochura V. V., Kuznetsov A. M., Shulga I. V. et al. Method of smelting in a blast furnace. Patent Ukraine, No. 141166. Applied: 01.08.2019. Published: 25.03.2020, Bulletin No. 6.
- Ramm A. N. Modern blast furnace process. Moscow: Metallurgiya, 1980. 303 p.
- Yaroshevsky S. L. Iron smelting using pulverized coal fuel. Moscow: Metallurgiya, 1988. 176 p.
- Yaroshevsky S. L., Afanasyeva Z. K., Kuzin A. V. Basic principles of calculation and organization of blast furnace smelting technology with replacement of 30–60% coke with additional fuels (domestic and foreign experience). *Creative heritage of B. I. Kitaev. Proceedings of the International scientific and practical conference. February 11–14, 2009, Yekaterinburg: UGTU-UPI*, 2009. pp. 138–148.
- Kurunov I. F. Current state of blast furnace production in China, Japan, South Korea, Western Europe, North and South America. *Metallurg*. 2015. No. 7. pp. 12–22.
- Kexin J., Jianliang Z., Chunlin C., Zhengjian L. et al. Operation characteristic of super-large blast furnace slag in China. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57, Iss. 6. pp. 983–988. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2016-615.
- Production and technology of iron and steel in Japan during 2022. *ISIJ International*. 2023. Vol. 63, Iss. 6. pp. 951–969. DOI: 10.2355/isijinternational.63.951.
- Katunin V. V., Zinovieva N. G., Ivanova I. M., Petrakova T. M. Key performance indicators of the Russian ferrous metallurgy industry in 2020. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2021. Vol. 77. No. 4. pp. 367–392.