

МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ

УДК 669.162.267.4

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160219

© Семаков В.В.¹, Русских В.П.², Семакова В.Б.³,
Кариков С.А.⁴, Кирсанов Р.Ю.⁵**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ВДУВАНИИ
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Проведено сравнение показателей восстановительных процессов доменной плавки при переходе на технологию вдувания пылеугольного топлива. Определены показатели работы печи до и после внедрения технологии плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива при одинаковых тепловых потерях. Показана целесообразность определения степени идеальности плавки по суммарному расходу твердого топлива. **Ключевые слова:** доменная печь, степень использования газа, критерий полноты косвенного восстановления.

Семаков В.В., Русских В.П., Семакова В.Б., Кариков С.А., Кирсанов Р.Ю. Аналітичне дослідження відновлювальних процесів у доменній печі при вдуванні пилоугольного палива. Мета статті – аналітично дослідити зміну показників відновлювальних процесів у доменній печі при частковій заміні коксу пилоугольним паливом (ПВП). Для компенсації погіршення газопроникності стовпа шихтових матеріалів в умовах вдування ПВП знижена частка прямих змішаних подач у циклах завантаження шихти. Проведене порівняння виявило, що показники відновлювальних процесів у розглянутих періодах досить близькі. Встановлено, що в передремонтному періоді до впровадження технології вдування ПВП до горну теплові втрати печі були вище практично на 2%. Сумарний коефіцієнт заміни коксу вугільним пилом не досяг 1 кг/кг ПВП. Визначено показники роботи доменної печі до і після впровадження вдування в горн пилоугольного палива з рівними втратами тепла. В результаті їх порівняння виявлено погіршення показників відновлювальних процесів при вдуванні до горну печі ПВП, а також наявність резерву зниження питомої витрати коксу за рахунок поліпшення відновлювальної роботи газового потоку. За допомогою графоаналітичної схеми доменного процесу проаналізовано зміну показників плавки в міру наближення складу газу в зоні сповільненого теплообміну до рівноважного за реакцією відновлення монооксиду заліза газами до і після впровадження вдування до горну пилоугольного палива. Визначено мінімальні теоретично можливі ступені прямого відновлення по М.О. Павлову, витрати коксу, твердого палива та газу-відновника. Проведено порівняння для розглянутих режимів роботи печі ступенів використання газу, комплексного показника відновлювальних процесів, критерію повноти протікання реакцій непрямого відновлення і показника ідеальності плавки. Показано доцільність визначення ступеня ідеальності доменної плавки за сумарною витратою твердого палива.

¹ канд. техн. наук, ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, semakov_v_v@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, russkih_v_p@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, semakova-v@ukr.net

⁴ начальник цеха, ЧАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь, sergey.karikov@metinvestholding.com

⁵ начальник отдела, ЧАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь, roman.kirsanov@metinvestholding.com

Ключові слова: доменна піч, ступінь використання газу, критерій повноти непрямого відновлення.

V.V. Semakov, V.P. Russkikh, V.B. Semakova, S.A. Karikov, R.Yu. Kirsanov. Analytical research of the reduction processes in blast furnace at powder coal injection. The objective of the article is to investigate analytically the alternations in reduction processes indices in a blast furnace at partial replacement of coke with powder coal. To compensate the reduced gas permeability of the charge materials column at powder coal injection the share of direct mixed supplies in charging cycles was decreased. The performed comparison revealed that the indices of reduction processes in the investigated periods turned out to be close enough. It was found out that in the period before repairs the thermal losses of the furnace were actually 2% higher before PC injection process implementation. The overall coefficient of coke replacement with coal powder did not reach the value of 1 kg/PCkg. The furnace operation indices before and after powder coal injection into the furnace hearth with equal thermal losses have been determined. The comparison revealed the worsening of reduction processes indices at powder coal injection into the furnace hearth as well as the possibility to reduce the specific coke consumption due to improvement in gas flow reducing operation. By means of graphical and analytical diagram of the blast furnace process all the alternations of melting indices have been analyzed with regard to the gas composition approximation within the area of decelerated thermal exchange to equilibrium condition, judging by reaction of iron monoxide reduction by gases before and after powder coal injection into the furnace hearth. The minimal theoretically possible degrees of direct reduction, according to M.A. Pavlov as well as the consumption of coke, solid fuel and the reducing gas have been determined. The analyzed operation modes have been comparatively studied, as well as the degrees of gas utilization, the complex index of reduction processes, the criterion of completeness of indirect reduction reactions and indices of the melting ideality. The usefulness of determination of the degree of melting ideality according to the overall consumption of solid fuel has been shown.

Keywords: blast furnace, degrees of gas utilization, criterion of completeness of indirect reduction reactions.

Постановка проблеми. В связи с высокой стоимостью кокса и природного газа широкое распространение получила технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменных печей (ДП), обеспечившая существенное снижение удельного расхода кокса, выполняющего роль разрыхлителя шихты. При этом изменилась структура столба шихтовых материалов, которая обуславливает распределение газового потока, а, следовательно, изменились условия протекания восстановительных процессов в доменной печи [1-3].

Анализ последних исследований и публикаций. Согласно [4] «по мере увеличения расхода ПУТ происходит сокращение расхода кокса, ... отвечающее замещению части теплоты кокса теплотой угля и некоторому уменьшению степени прямого восстановления при незначительном изменении температуры колошникового газа. При этом первая составляющая определяет сокращение расхода кокса более чем на 80% и мало зависит от условий плавки», а вторая составляющая зависит от условий восстановительного процесса. По данным [1] при практически неизменных основных технологических параметрах плавки «степень использования восстановительной энергии газового потока повышалась пропорционально расходу угольной пыли на 1,0÷1,5% на каждые 10 кг угля», что обусловлено снижением выхода восстановительных газов, увеличением зоны умеренных температур и времени контакта газов-восстановителей с оксидами железа.

Вследствие многообразия явлений, происходящих в рабочем пространстве доменной печи при высоких температурах и повышенном давлении в противотоке огромных масс шихтовых материалов и восстановительного газа, и затруднительности их физического моделирования, а также прямых измерений параметров доменной плавки, получили значительное развитие математические методы исследования [5, 6]. Компьютеризация научной и производственной

деятельности позволила применять для анализа и контроля доменной плавки сложные математические расчеты, проводить прогнозную оценку показателей работы печи при изменении технологических параметров.

Аналитические исследования [4] показали возможность достижения низкого расхода кокса в пределах 257-304 кг/т за счет вдувания ПУТ до 250 кг/т при совершенствовании распределения рудных нагрузок по сечению печи, которое позволяет обеспечить достаточную газопроницаемость столба шихтовых материалов при повышении рудных нагрузок свыше 4,5 кг/кг кокса. При этом отмечается, что в зависимости от условий плавки величина сокращения степени прямого восстановления может быть различной, что также влияет на величину эквивалента замещения кокса пылеугольным топливом.

Цель статьи – аналитически исследовать изменение показателей восстановительных процессов в доменной печи при частичной замене кокса пылеугольным топливом.

Изложение основного материала. На основе математической модели, разработанной в ДВНЗ «ПГТУ» [7], проанализирована работа доменной печи полезным объемом 1719 м³ при внедрении технологии вдувания в горн ПУТ. До внедрения данной технологии доменная печь загружалась циклом подач ААКК↓-*n*, КААК↓-*m* (90% при *n* = 4, *m* = 1, остальное – при *n* = 3, *m* = 2), способствующим преимущественно подгрузке рудными материалами периферийной зоны печи. Параметры технологического режима работы печи приведены в таблице.

Таблица

Показатели работы доменной печи при изменении технологии плавки

Показатель	без вдувания ПУТ	с вдуванием ПУТ
Удельная производительность, т/(м ³ ·сут.)	1,825	1,942
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	440,5	366,9
Удельный расход коксового орешка, кг/т чугуна	74,7	60,6
Удельный расход ПУТ, кг/т чугуна	-	89
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	57,3	62,2
Расход известняка, кг/т чугуна	38,9	29,1
Содержание железа в шихте, %	57,22	56,36
Температура дутья, °С	989	1058
Содержание кислорода в дутье, %	23,5	25,2
Давление газа под колошником, кПа	124	126

При внедрении технологии вдувания ПУТ в количестве 89 кг/т чугуна рудная нагрузка на кокс повысилась с 3,62 до 4,54 кг/кг, что привело к снижению газопроницаемости шихты. Для обеспечения плавного схода шихты в цикле загрузки было уменьшено количество прямых подач: *n* = 2, *m* = 3. При вдувании ПУТ суммарный расход твердого топлива (кокса, коксового орешка и пылеугольного топлива) несколько увеличился с 515,2 до 516,5 кг/т чугуна при повышении расхода природного газа с 57,3 до 62,2 м³/т чугуна.

Эффективность хода восстановительных процессов в печи оценивалась несколькими показателями [8]: степенью использования СО η_{CO} , суммарной степенью использования восстановительной способности газа η_{Σ} , степенью использования газа η_{FeO} для реакции восстановления Fe из FeO в зоне замедленного теплообмена, комплексным показателем эффективности восстановительных процессов И.Ф. Курунова δ_{η} [9], критерием полноты протекания косвенного восстановления K_{η} и показателем идеальности плавки В.Н. Андропова ξ [10].

При переходе на технологию вдувания ПУТ η_{CO} повысилась с 47,44 до 47,66%. Показатели η_{Σ} и η_{FeO} , в отличие от η_{CO} , снизились – η_{Σ} с 46,46 до 46,17% и η_{FeO} с 27,53 до 27,23%. Аналогично изменился показатель δ_{η} , сократившись с 83,23 до 82,32%. Таким образом, в рассматриваемых периодах при некотором раскрытии периферии в условиях вдувания в горн печи ПУТ несколько снизилась эффективность восстановительной работы газового потока. При этом степень прямого восстановления r_d по М.А. Павлову возросла с 34,86 до 36,16%.

Степень использования газа по FeO, наряду с удельным суммарным расходом твердого топлива, степенью прямого восстановления r_d , является параметром эталонирования математической модели, позволяющей прогнозировать показатели работы доменной печи при разных

технологических режимах по мере улучшения восстановительной работы газового потока. Результаты моделирования представлены на рисунке 1 в виде графоаналитической схемы доменного процесса (ГАСДП), аналогичной P - q -диаграмме А.Н. Похвиснева [11, 12].

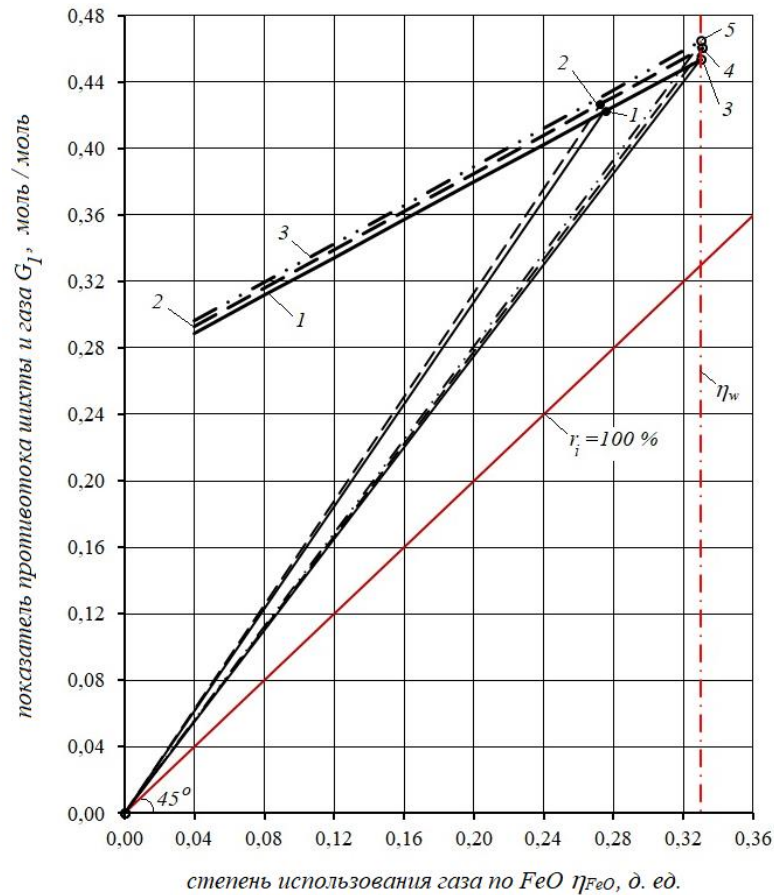


Рис. 1 – Графоаналитическая схема доменного процесса

Линии 1-3 характеризуют изменение показателя противотока шихты и газа G_1 , обратного расхода газа-восстановителя V_s на единицу атомарного кислорода монооксида железа шихты, по мере приближения степени использования газа по FeO к максимальной теоретически возможной $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$, при которой в зоне замедленного теплообмена достигается равновесный состав газа. Линия 1, соответствующая технологическому режиму работы печи без вдувания ПУТ, расположена ниже линии 2, характеризующей режим с вдуванием ПУТ, т. е. режим работы без вдувания ПУТ был менее экономичным. При внедрении технологии плавки с применением ПУТ V_s несколько снизился с 2,366 (точка 1) до 2,344 моль/моль (точка 2).

Анализируемые периоды работы печи отличались тепловыми потерями практически на 2% (абс.). После проведенного ремонта доменной печи, в ходе которого выполнено шоткретирование шахты, тепловые потери в условиях вдувания ПУТ были снижены до $\Delta Q = 9,7\%$. Суммарный коэффициент замены кокса ПУТ [1] составил $\Sigma K_s = 0,83$ кг/кг ПУТ с учетом высоких тепловых потерь на печи до внедрения технологии плавки с вдуванием ПУТ.

В связи с отличиями ΔQ в рассматриваемых периодах путем математического моделирования построена линия 3, характеризующая режим работы доменной печи без вдувания ПУТ с тепловыми потерями 9,7%, равными тепловым потерям при работе печи с вдуванием ПУТ, который является наиболее экономичным. Точки 3-5 характеризуют достижение равновесной степени использования газа η_w , в которых максимальные теоретически возможные показатели противотока шихты и газа G_1 для рассматриваемых режимов плавки составляют 0,454; 0,460; 0,465 моль/моль соответственно. Фактические показатели G_1 в производственных условиях составили 0,423 (точка 1) и 0,427 моль/моль (точка 2).

Тангенсы углов между осью G_1 и прямыми, проведенными из начала координат через точки 1 и 2, показывают фактические степени косвенного восстановления r_i , равные 65,14% (технология без вдувания ПУТ, $\Delta Q = 11,62\%$) и 64,84% (с вдуванием ПУТ, $\Delta Q = 9,7\%$). Тангенсы углов между осью G_1 и прямыми, проведенными из начала координат через точки 3-5, показывают максимальные теоретически возможные степени косвенного восстановления при различных режимах работы печи, равные 72,74% (без вдувания ПУТ, $\Delta Q = 11,62\%$), 71,90% (с вдуванием ПУТ, $\Delta Q = 9,7\%$) и 71,08% (без вдувания ПУТ, $\Delta Q = 9,7\%$), которые практически не достижимы и в настоящих условиях доменной плавки не соответствуют 100%.

На рисунке 2 представлено изменение по мере приближения степени использования газа по FeO к максимальной теоретически возможной $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ расхода газа-восстановителя V_s (а) и степени прямого восстановления (б), а на рисунке 3 – суммарного расхода твердого топлива (а) и удельного расхода кокса (б), полученное путем математического моделирования для разных режимов плавки: 1 – технология без вдувания ПУТ при $\Delta Q = 11,62\%$; 2 – с вдуванием ПУТ при $\Delta Q = 9,7\%$; 3 – без вдувания ПУТ при $\Delta Q = 9,7\%$. При достижении равновесного состава газа больший $V_{s,w} = 2,204$ моль/моль соответствует технологии без вдувания ПУТ при $\Delta Q = 11,62\%$ и $r_{d,w} = 27,26\%$, а меньший $V_{s,w} = 2,152$ моль/моль при $r_{d,w} = 28,92\%$ и $\Delta Q = 9,7\%$. Для условий вдувания ПУТ – $V_{s,w} = 2,172$ моль/моль при $r_{d,w} = 28,1\%$. Таким образом, при одинаковых тепловых потерях наиболее экономичным был режим плавки без вдувания ПУТ, что подтверждается сокращением $V_{s,w}$. Степень прямого восстановления зависит от условий плавки, следовательно, проводить сравнение экономичности восстановительного процесса для разных режимов работы печи по данному показателю некорректно.

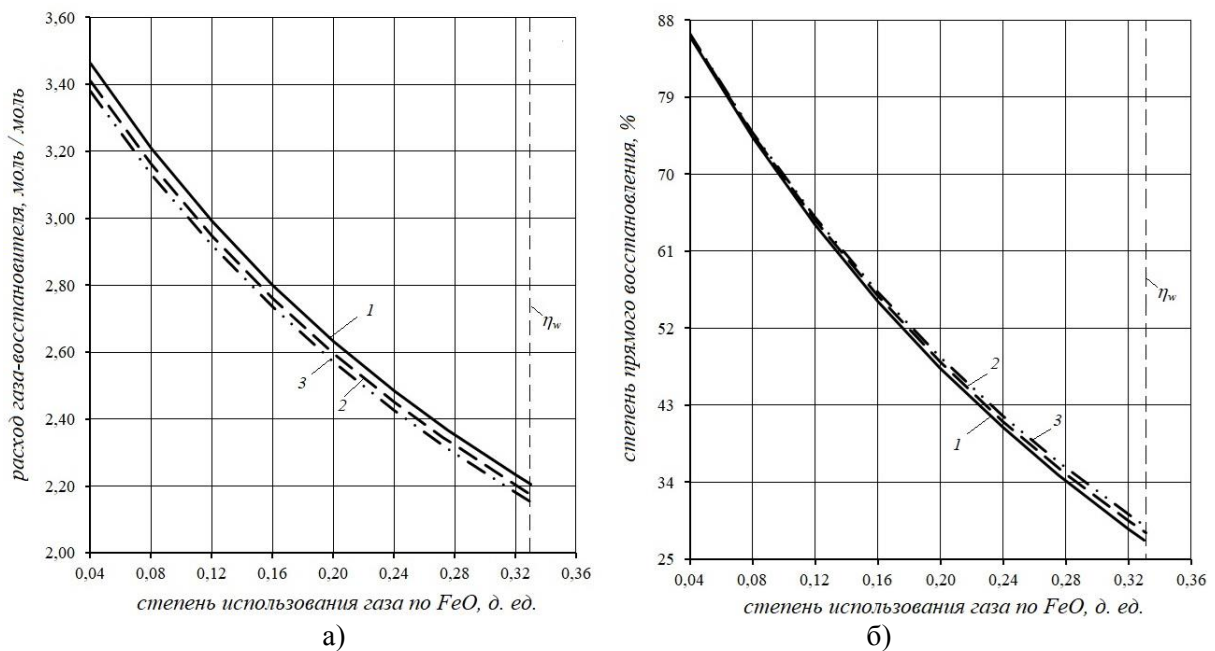


Рис. 2 – Изменение по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ показателей плавки: а) – расхода газа-восстановителя V_s ; б) – степени прямого восстановления r_d

Прогнозные линии изменения суммарного расхода твердого топлива по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ до (линия 1) и после (линия 2) внедрения ПУТ практически совпадают, как показано на рисунке 3 (а), а минимальный теоретически возможный суммарный расход твердого топлива $P_{t,min}$ составляет 458,9 и 455,1 кг/т чугуна соответственно. Наименьший $P_{t,min} = 446,7$ кг/т чугуна соответствует режиму плавки без вдувания ПУТ при $\Delta Q = 9,7\%$. Наименьший минимальный теоретически возможный расход кокса $K_{min} = 305,5$ кг/т чугуна получен расчетным путем для технологии плавки с вдуванием ПУТ за счет собственно замещения части кокса угольной пылью. Для технологии без вдувания ПУТ $K_{min} = 384,2$ кг/т чугуна при $\Delta Q = 11,62\%$ и $K_{min} = 372,0$ кг/т чугуна при $\Delta Q = 9,7\%$ (рис. 3, б).

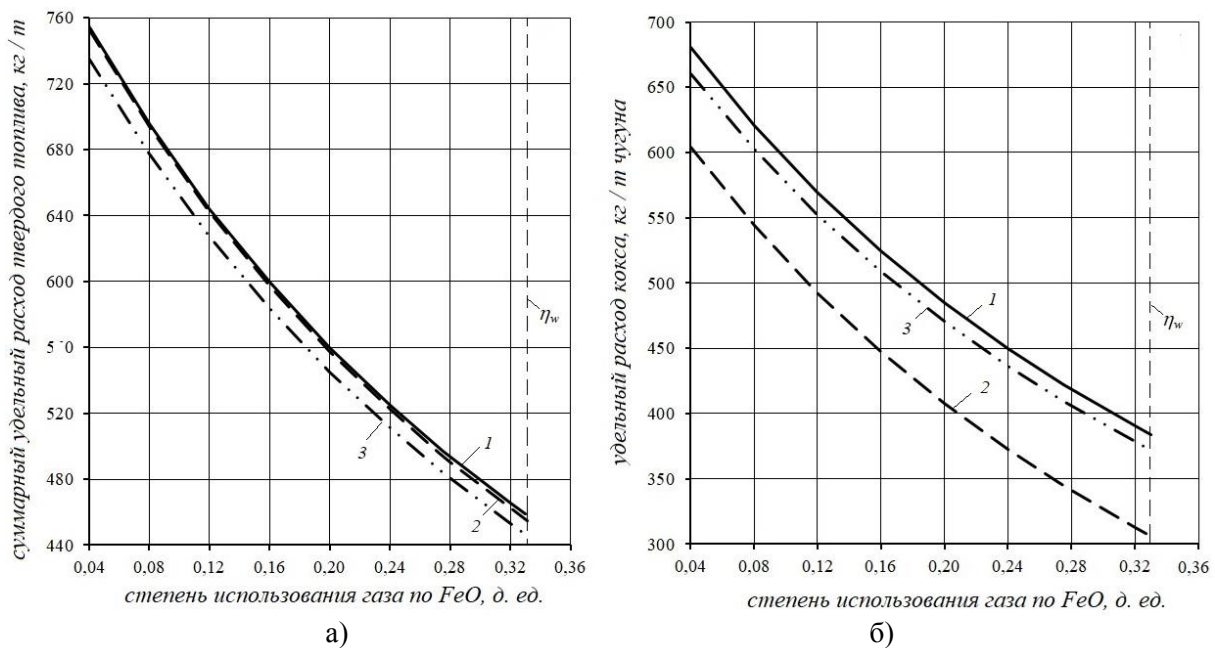


Рис. 3 – Изменение по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ удельного расхода топлива доменной плавки: а) – расхода кокса; б) – суммарного расхода кокса, коксового орешка и ПУТ

Наиболее объективными показателями восстановительных процессов, по которым можно сравнивать работу печи при разных технологических режимах либо работу разных печей, являются комплексный показатель И.Ф. Курунова δ_η и критерий K_{r_i} . Прогнозные линии изменения показателя δ_η по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ для анализируемых режимов практически совпадают и представлены на рисунке 4 линией 1, аналогично для показателя K_{r_i} – линией 2. Максимальные значения $\delta_\eta = 100\%$ и $K_{r_i} = 100\%$ в действующей доменной печи практически недостижимы в связи с необходимостью создания заданной неравномерности распределения материалов и газов по радиусу колошника.

Критерий K_{r_i} при исследуемых режимах составлял 89,60% (без вдувания ПУТ) и 88,81% (с вдуванием ПУТ). Данный критерий показывает степень приближения фактически достигнутой r_i к максимальной теоретически возможной, т. е. позволяет оценить резерв косвенного восстановления в доменной печи, который при разных режимах составлял 10,4% и 11,19% соответственно. Показатель И.Ф. Курунова δ_η показывает степень приближения состава газа к равновесному в зоне замедленного теплообмена и позволяет оценить лишь фактическое недоиспользование газа-восстановителя в печи при данном его расходе, так как не учитывает снижение расхода газа-восстановителя по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ (рис. 2, а).

Показатель идеальности плавки [9], характеризующий соотношение минимального теоретически возможного и фактического расхода кокса $\xi = 100 K_{min}/K$, в анализируемые периоды составил 91,0% (без вдувания ПУТ) и 88,1% (с вдуванием ПУТ), что свидетельствует о наличии некоторого резерва снижения расхода кокса и соответствует данным В.Н. Андропова.

Линии 3 и 4, характеризующие изменение данного показателя ξ по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$, различаются (рис. 4), что связано с заменой части кокса пылеугольным топливом (линия 3), сближаясь при приближении состава газа к равновесному, при котором достигается максимальный теоретически возможный показатель совершенства доменной плавки $\xi_{max} = 100\%$ [9]. Линия 4 соответствует технологическому режиму плавки без вдувания ПУТ: расчетные значения ξ при тепловых потерях печи 9,7% и 11,62% близки. Показатель идеальности плавки, рассчитанный как отношение минимального теоретически возможного и фактического суммарного расхода твердого топлива $\xi_T = 100 T_{min}/T$, в анализируемые периоды был выше ξ и составил 92,3% (без вдувания ПУТ) и 91,7% (с вдуванием ПУТ), однако тоже несколько снизился при

вдувании в горн печи ПУТ. Линии, описывающие его изменение по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$ при исследуемых режимах плавки, практически сливаются в одну линию 5. Показатель ξ_T является более объективным по сравнению с ξ , который показывает завышенный резерв снижения расхода кокса, например, при $\eta_{FeO} = 0,24$ д. ед. в условиях вдувания ПУТ $\xi_T = 87,2\%$ (резерв 12,8%), а $\xi = 82,0\%$ (резерв 18,0%), так как не учитывает удельный расход пылеугольного топлива.

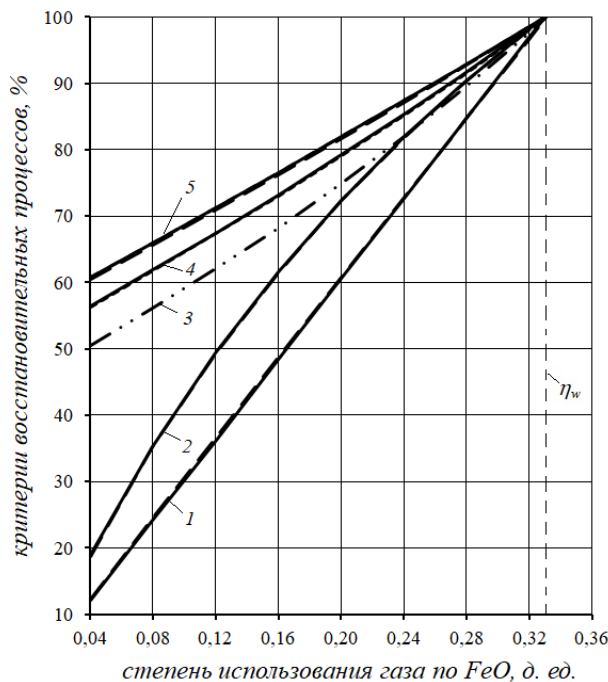


Рис. 4 – Изменение критериев восстановительных процессов по мере приближения $\eta_{FeO} \rightarrow \eta_w$

Выводы

1. Применение технологии вдувания в горн доменной печи ПУТ в рассматриваемых периодах привело к некоторому ухудшению фактических показателей восстановительных процессов: степень использования газа по реакции восстановления $FeO \eta_{FeO}$ снизилась с 27,53 до 27,23%, степень достижения равновесного состава газа в зоне замедленного теплообмена δ_{η} – с 83,23 до 82,32%, критерий полноты протекания реакций косвенного восстановления K_{r_i} – с 89,60 до 88,81%.

2. При одинаковых тепловых потерях доменной печи в условиях вдувания в горн ПУТ снизилась эффективность восстановительной работы газового потока: повысились минимальные теоретически возможные расход газа-восстановителя с 2,152 до 2,172 моль/моль и суммарный расход твёрдого топлива с 446,7 до 455,1 кг/т чугуна.

3. Анализ изменения показателя идеальности доменной плавки по мере повышения степени использования восстановительной способности газа в разных технологических режимах показал целесообразность его расчета по суммарному расходу твердого топлива.

4. Для исследуемого режима работы с вдуванием ПУТ выявлен резерв косвенного восстановления и снижения расхода кокса, который может быть реализован за счет улучшения контакта газа-восстановителя с шихтовыми материалами при совершенствовании систем загрузки доменной печи.

Список использованных источников:

1. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С.Л. Ярошевский. – М. : Металлургия, 1988. – 176с.
2. О технологии доменной плавки при использовании пылеугольного топлива / В.Г. Аносов [и др.] // Металургія : Зб. наук. пр. / ЗДІА. – Запоріжжя, 2009. – Вип. 20. – С. 37-43.

3. Семакова В.Б. Вдувание пылеугольного топлива в доменные печи ПАО «ММК им. Ильича» при их загрузке утяжеленными подачами / В.Б. Семакова, Ю.А. Зинченко, Ю.О. Шадловский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 3. – С. 18-21.
4. Товаровский И.Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки / И.Г. Товаровский. – Днепропетровск : Журфонд, 2015. – 912 с.
5. Automatic control software for the blast-furnace shop / V.V. Lavrov [et al.] // *Steel in Translation*. – 2015. – Vol. 45. – № 9. – Pp. 669-673.
6. Дмитриев А.Н. Развитие и применение теории газодинамики, тепло- и массообмена для решения практических задач доменного производства на основе комплекса математических моделей / А.Н. Дмитриев // *Познание процессов доменной плавки : кол. труд / НАН Украины. Ин-т черной металлургии*. – Д. : Пороги, 2006. – С. 207-226.
7. Семакова В.Б. Аналитическое исследование возможности снижения расхода кокса при улучшении восстановительной работы газового потока в доменной печи / В.Б. Семакова, В.В. Семаков // *Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ*. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 36-41. – (Серія : Технічні науки).
8. Reducing action of the gas flux in blast furnaces at PAO MMK im. Il'icha / V.B. Semakova [et al.] // *Steel in Translation*. – 2011. – Vol. 41. – № 2. – Pp. 123-127. – Mode of access: DOI: [10.3103/S096709121102015X](https://doi.org/10.3103/S096709121102015X).
9. Курунов И.Ф. Методика оценки эффективности восстановительных процессов в доменной печи / И.Ф. Курунов // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1982. – № 3. – С. 20-23.
10. Андронов В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки : учебное пособие / В.Н. Андронов. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. – 142 с.
11. Русских В.П. Анализ влияния восстановимости железорудной шихты на показатели доменной плавки / В.П. Русских, В.В. Семаков // *Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ»*. – Маріуполь, 2012. – Вип. 25. – С. 27-35. – (Серія : Технічні науки).
12. Semakova V.B. Economic analysis of reduction processes in blast furnaces / V.B. Semakova, V.V. Semakov, D.I. Gavriloglu // *Steel in Translation*. – 2012. – Vol. 42. – № 4. – Pp. 319-323. – Mode of access: DOI: [10.3103/S0967091212040146](https://doi.org/10.3103/S0967091212040146).

References:

1. Jaroshevskij S.L. *Vyplavka chuguna s primeneniem pyleugol'nogo topliva* [Smelting iron using pulverized fuel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 176 p. (Rus.)
2. Anosov V.G., Fomenko A.P., Krutas N.V., Tsaplina T.S. O tehnologii domennoj plavki pri ispol'zovanii pyleugol'nogo topliva [About blast furnace smelting technology using pulverized coal]. *Metallurgija – Metallurgy, Zaporizhzhia*, 2009, vol. 20, pp. 37-43. (Rus.)
3. Semakova V.B., Zinchenko Yu.A., Shadlovskiy Yu.O. Vduvanie pyleugol'nogo topliva v domennye pechi PAO «MМК im. Il'icha» pri ih zagruzke utjazhelennymi podachami [Powder coal injection into the blast furnaces at PAO MMK im. Il'icha charged with heavier supplies]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 3, pp. 18-21. (Rus.)
4. Товаровский И.Г. *Poznaniye protsessov i razvitiye tekhnologii domennoj plavki* [Cognition of processes and development of blast furnace smelting technology]. Dnepropetrovsk, Zhurfond Publ., 2015, 912 p. (Rus.)
5. Lavrov V.V., Spirin N.A., Burykin A.A., Shchipanov K.A., Rybolovlev V.Yu. Automatic control software for the blast-furnace shop. *Steel in Translation*, 2015, vol. 45, no. 9, pp. 669-673.
6. Dmitriyev A.N. Razvitiye i primeneniye teorii gazodinamiki, teplo- i massoobmena dlya resheniya prakticheskikh zadach domennogo proizvodstva na osnove kompleksa matematicheskikh modeley [Development and application of the theory of gas dynamics, heat and mass transfer for solving practical problems of blast furnace production on the basis of a complex of mathematical models]. *Poznaniye protsessov domennoj plavki – Cognition of processes of blast furnace smelting*, Dnepropetrovsk, 2006, pp. 207-226. (Rus.)
7. Semakova V.B., Semakov V.V. *Analiticheskoye issledovaniye vozmozhnosti snizheniya raskhoda koksa pri uluchshenii vosstanovitel'noy raboty gazovogo potoka v domennoj pechi* [Analytical research of decrease coke consumption possibility at improvement of gas stream reduction work in

- the blast furnace]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, Mariupol', 2011, vol. 22, pp. 36-41. (Rus.)
8. Semakova V.B., Tomash A.A., Semakov V.V., Dolya S.N., Kosolap N.V. Reducing action of the gas flux in blast furnaces at PAO MMK im. Il'icha. *Steel in Translation*, 2011, vol. 41, no. 2, pp. 123-127. doi: 10.3103/S096709121102015X.
 9. Kurunov I.F. Metodika ocenkiy effektivnosti vosstanovitel'nyh processov v domennoj pechi [Method for evaluating the efficiency of reduction processes in the blast furnace]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaia Metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1982, no. 3, pp. 20-23. (Rus.)
 10. Andronov V.N. *Minimal'no vozmozhnyj rashod koksa i vliyanie na nego razlichnyh faktorov domennoj plavki* [The minimum possible coke consumption and the influence on it of various factors of blast furnace smelting]. Sankt-Peterburg, SPbGTU Publ., 2001. 142 p. (Rus.)
 11. Russkih V.P., Semakov V.V. Analiz vliyanija vosstanovimosti zhelezorudnoj shihty na pokazateli domennoj plavki [Analysis of influence of the ore materials reducibility upon indexes of blast furnace smelting]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, Mariupol', 2012, vol. 25, pp. 27-35. (Rus.)
 12. Semakova V.B., Semakov V.V., Gavriloglu D.I. Economic analysis of reduction processes in blast furnaces. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 4, pp. 319-323. doi: 10.3103/S0967091212040146.

Рецензент: Л. И. Тарасюк
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.08.2018

УДК 669.054.824

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160221

© Кравченко В.П.¹, Таранина Е.В.², Лазаревская Ю.А.³

ПЕРЕРАБОТКА ОТВАЛЬНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Разработаны технологические схемы переработки отвальных доменных и смеси металлургических шлаков. Согласно схеме переработки отвальных доменных шлаков, кроме отделения магнитной фракции, предусматривается получение строительного щебня, вяжущего материала и микрозаполнителей для получения высокопрочных бетонов. Комплекс оборудования выполнен по блочно-модульному принципу, где однотипная несущая металлическая конструкция каждого блока, связанного в составе комплекса консольными ленточными конвейерами, позволяет установить блок на спланированную поверхность промышленной площадки без фундамента. В технологической схеме комплексной переработки смеси отвальных металлургических шлаков предусматривается, кроме получения строительных материалов, комплекс технологических мер по раскрытию сырья путем его магнитно-гравитационной сепарации, что позволяет обеспечить содержание металла в получаемом скраповом концентрате (магнитном и немагнитном) до 95%, а прогнозируемое извлечение скрапа – не менее 90...92%.

Ключевые слова: металлургические шлаки, грохочение, измельчение, магнитно-гравитационная сепарация, фракция, скрап, строительный щебень, вяжущий материал.

¹ канд. техн. наук, ЧП «Эра плюс», г. Мариуполь

² ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, avalonn777@ukr.net

³ зав. лабораторией, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь