УДК 669.162.267.4

В.Н. Захарченко[1], канд. техн. наук, гл. доменщик, e-mail: vnz1964@gmail.com
В.П. Русских[2], канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
Н.В. Косолап[3], начальник доменного цеха

[1]Объединение предприятий «Укрметаллургпром», Днепр, Украина
[2]ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, Украина
[3]ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича», Мариуполь, Украина

Проблемы вдувания пылеугольного топлива в доменные печи

Внедрение технологии с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) вызывает нарушение оптимального технологического режима доменной плавки, вызванного изменением температурно-теплового режима горна и снижением газопроницаемости столба шихтовых материалов. Произведен анализ изменения технологических параметров и теплового состояния печи при подаче ПУТ. Определены технологические и технические способы увеличения количества подаваемого в доменные печи ПУТ.

Ключевые слова: *доменная плавка, пылеугольное топливо, кокс, технологические параметры, критерий газодинамической устойчивости, зона когезии, газопроницаемость.*

Металлургический комплекс сегодня и в обозримом будущем останется одной из основ украинской экономики. Подача пылеугольного топлива (ПУТ) в горн доменных печей стала неотъемлемым элементом современных энерго- и ресурсосберегающих технологий производства чугуна.

Подача пылеугольного топлива в доменные печи позволяет на 30–40 % снизить расход кокса и существенно сократить потребление природного газа вплоть до его полного исключения при производстве чугуна, но требует внести ряд существенных изменений в технологический процесс доменной плавки.

Металлургические предприятия Украины заинтересованы в скорейшем внедрении в полном объеме технологии подачи пылеугольного топлива в доменные печи. Поэтому в настоящее время в черной металлургии Украины нет более важной проблемы, чем широкое эффективное внедрение этой коксозаменяющей технологии производства чугуна.

Однако внедрение ПУТ-технологии вызывает нарушение оптимального технологического режима доменной плавки, вызванного изменением температурно-теплового режима горна и снижением газопроницаемости столба шихтовых материалов в связи с уменьшением в нем доли кокса.

Восстановление и стабилизация базового оптимального режима доменной плавки при вдувании ПУТ является главной задачей, так называемой теории полной и комплексной компенсации отрицательного влияния вдувания пылеугольного топлива на доменный процесс, разработанной С.Л. Ярошевским в соавторстве с другими учеными и специалистами [1].

Важным обстоятельством, которое необходимо учитывать при использовании пылеугольного топлива в доменной плавке, является необходимость создания таких тепловых и газодинамических условий в печи, которые бы обеспечивали ее высокопроизводительную работу при больших расходах ПУТ. Определяющими факторами при этом [2] являются:

– температура дутья и содержание в нем кислорода (не ниже 1100 °С и 25 % соответственно), позволяющих компенсировать снижение теоретической температуры горения у фурм, обеспечить необходимое тепловое состояние горна и полноту горения ПУТ;

– постреакционная («горячая») прочность кокса CSR, (не менее 60 %) и, соответственно, его реакционная способность CRI (не более 25–30 %), непосредственно влияющие на проницаемость коксовой насадки для газов и жидких продуктов плавки;

– повышение прочности железорудных компонентов шихты и снижение содержания в ней мелочи (не более 5 % фракции менее 5 мм).

Эти факторы в некоторой степени выполняются в доменных цехах металлургических комбинатов им. Ильича и «АЗОВСТАЛЬ».

Немаловажное значение имеет полнота сгорания угольных частиц в горне доменной печи. Однако обычное обогащение дутья кислородом не дает должного эффекта, в связи с чем разработаны способы локального подвода кислорода непосредственно к струе ПУТ. В результате были предложены различные варианты совместного вдувания ПУТ и кислорода, наиболее распространенным из которых является коаксиальная горелка, успешно опробованная за рубежом [3].

К основным негативным последствиям вдувания пылеугольного топлива в доменные печи следует отнести: снижение газопроницаемости столба шихтовых материалов, приближение фокуса горения к стенам печи, неполнота сгорания пылеугольного топлива.

На основании обобщения опыта внедрения технологии доменной плавки с вдуванием в печи ПУТ

По материалам 27-й конференции доменщиков Украины

в доменном цехе металлургического комбината им. Ильича и анализа его влияния на технологические параметры и тепловое состояние доменной печи, разработаны технические предложения, использование которых позволит увеличить расход ПУТ до 200 кг на выплавку тонны чугуна.

С целью снижения расхода кокса на выплавку чугуна в доменном цехе ПАО «ММК им. Ильича» с 2012 года внедряется технология вдувания пылеугольного топлива [4]. На данный момент количество угольной пыли, вдуваемой в горн доменных печей, превышает 100 кг/т чугуна (рис. 1, *а*), что при коэффициенте замены кокса угольной пылью 0,8 позволяет экономить кокс до 120 кг/т производимого чугуна. При этом расход кокса на тонну чугуна снижается с 470–520 до 350–400 кг/т (рис. 1, *б*). Дальнейшее снижение расхода кокса за счет увеличения вдувания пылеугольного топлива возможно при условии рациональной организации противотока шихты и газа, так как при увеличении расхода ПУТ увеличивается перепад давления газа по высоте печи (рис. 1, *в*).

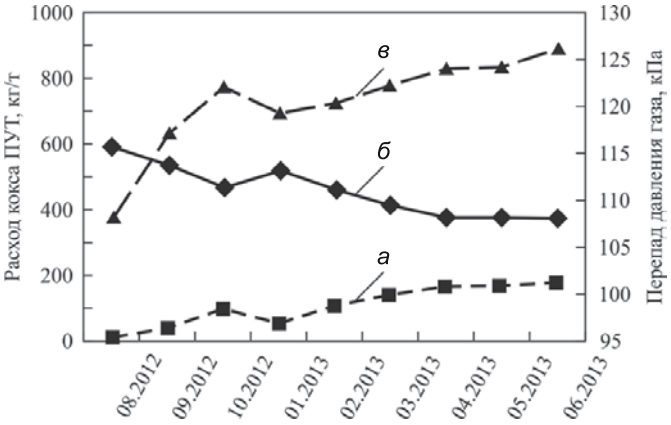

Рис. 1. Динамика изменения расхода кокса и перепада давления газа в доменной печи № 3 ЧАО «ММК им. Ильича» при увеличении расхода ПУТ на выплавку чугуна: *а* – расход ПУТ, кг/т чугуна; *б* – расход кокса, кг/т чугуна; *в* – перепад давления газа по высоте доменной печи, кПа

Максимально возможное количество вдуваемого ПУТ ограничивается тепловым состоянием доменной плавки, о котором можно судить по составу чугуна, шлака и газодинамическим режимом, определяющимся перепадом давления газа по высоте печи и критерием газодинамической устойчивости столба шихты (ГДУ) (уравнение 1):

$$\text{ГДУ} = \frac{\Delta P / H}{\rho g}, \qquad (1)$$

где ρ – насыпная плотность столба шихтовых материалов, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\Delta P/H$ – градиент перепада давления газа по высоте столба шихтовых материалов, кг/(с^{2}м^2).

Также немаловажным критерием, ограничивающим расход ПУТ, является теоретическая температура горения и характеристики окислительной зоны (ее размеры).

Произведен анализ изменения параметров доменной плавки для печей ПАО «ММК им. Ильича» (рис. 2) с изменением расхода ПУТ.

С увеличением расхода ПУТ нагрев печей снижался, что подтверждается уменьшением химического нагрева чугуна ([Si]↓, [S]↑) и шлака ((S)↓, (CaO)/(SiO_2)↓).

Снижение содержания кремния в чугуне происходит за счет торможения эндотермической реакции его восстановления при понижении температуры. Увеличение содержания серы в чугуне вызвано снижением основности шлака и повышением его вязкости с понижением температуры. В этих условиях уменьшается переход серы в шлак. Основность шлака снижается в связи с уменьшением восстановления кремния – большее количество кремнезема остается в шлаке.

Также произведен анализ газодинамического состояния печей (рис. 3). С увеличением расхода ПУТ перепад давления газа в печах увеличивался, несмотря на то, что при увеличении расхода ПУТ объем печных газов уменьшается. Данный факт объясняется снижением газопроницаемости сухой части доменной печи из-за уменьшения доли кокса в шихте и, в результате этого, уменьшения высоты коксовых окон в зоне когезии. Также может снижаться газопроницаемость в нижней части доменной печи из-за того, что пылеугольное топливо может не полностью сгорать в окислительной зоне.

С вдуванием угольной пыли изменяется не только перепад давления газа, но и насыпная плотность материалов, находящихся в доменной печи. Это происходит в результате того, что из шихты исключается кокс, на замену которому приходят железорудные материалы.

Критическим расходом ПУТ для доменных печей можно считать, в соответствии с оптимальной величиной критерия газодинамической устойчивости слоя, 200 кг/т чугуна (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что на всех печах, кроме доменной печи № 5, наблюдалось снижение показателя ГДУ с увеличением расхода ПУТ и перепада давления газа, что связано с уменьшением выхода печных газов и увеличением насыпной массы шихты. При этом производительность печей не снизилась. Еще большее повышение расхода ПУТ возможно при уменьшении расхода дутья в результате его обогащения кислородом, однако это негативно скажется на распределении газа по радиусу печи. При снижении расхода дутья уменьшится протяженность зоны циркуляции кокса, увеличится интенсивность периферийного потока газов. Это негативно скажется на использовании тепловой и химической энергии газов, а также на стойкости огнеупорной кладки и системы охлаждения доменной печи.

Расчет показал, что с увеличением расхода ПУТ фокус горения в окислительной зоне приближается к периферии. Без вдувания ПУТ фокус горения располагается на расстоянии, примерно 0,5 м от торца фурмы, а при увеличении расхода ПУТ до 170 кг/т фокус горения располагается на расстоянии 0,38–0,4 м, при условии повышения температуры дутья и содержания кислорода в нем. При расходе ПУТ 145 кг/т

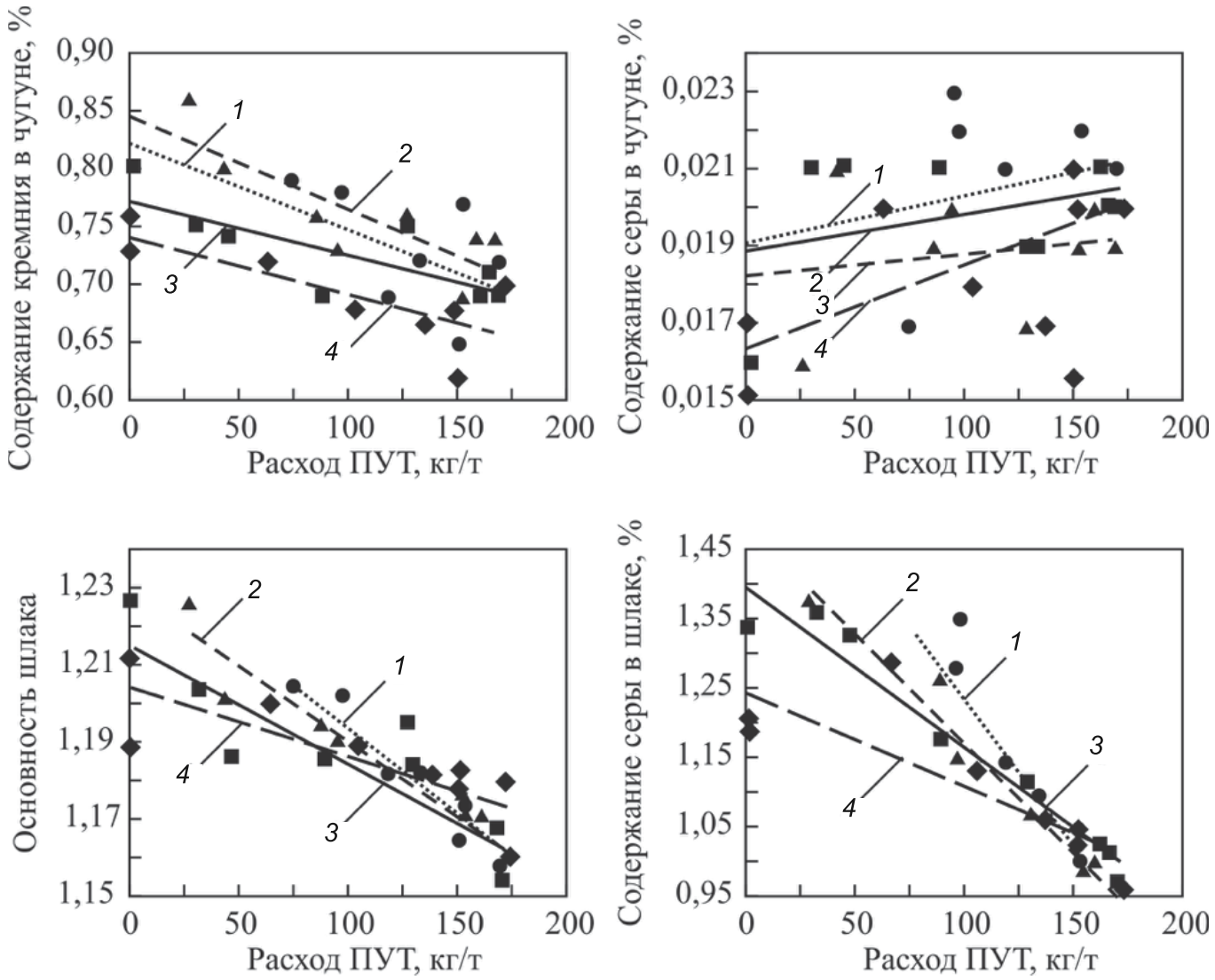

Рис. 2. Изменение параметров доменной плавки при изменении расхода ПУТ в условиях работы доменного цеха ЧАО «ММК им. Ильича»: *1* – доменная печь № 1; *2* – доменная печь № 3; *3* – доменная печь № 4; *4* – доменная печь № 5

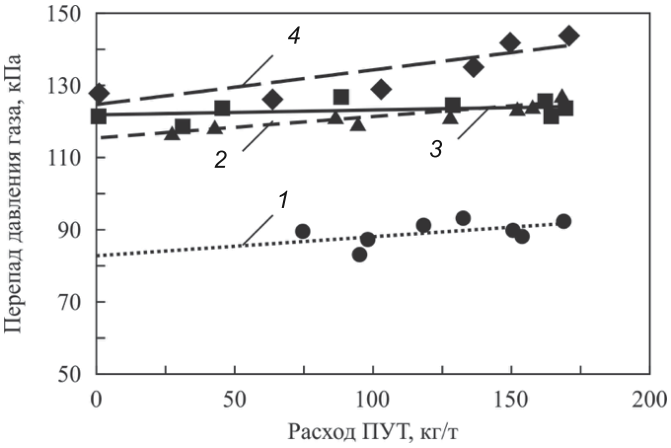

Рис. 3. Изменение перепада давления газа в доменных печах ЧАО «ММК им. Ильича»: *1* – доменная печь № 1; *2* – доменная печь № 3; *3* – доменная печь № 4; *4* – доменная печь № 5

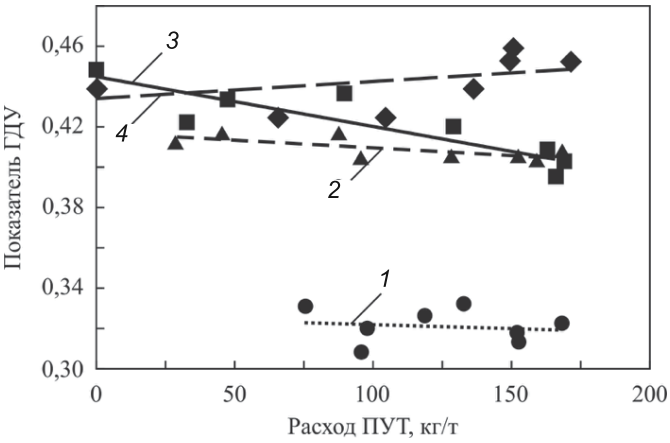

Рис. 4. Изменение критерия газодинамической устойчивости при изменении расхода ПУТ: *1* – доменная печь № 1; *2* – доменная печь № 3; *3* – доменная печь № 4; *4* – доменная печь № 5

чугуна фокус горения располагается на расстоянии 0,42–0,45 м от торца фурмы. На доменной печи № 4 для поддержания такого расстояния, при увеличении количества подаваемого в печь ПУТ до 170 кг/т, необходимо поддерживать расход дутья в пределах 68–70 м^3/с. При этом перепад давления возрастет с 123 кПа до 151 кПа. При таком перепаде давления газа в печи будет наблюдаться тугой сход шихты, так как показатель ГДУ приблизится к 0,5. Следовательно, с газодинамической точки, максимальным

является расход ПУТ 170 кг/т чугуна при повышенном расходе дутья, с целью отдаления фокуса горения в зоне циркуляции кокса на расстояние 0,42–0,45 м. В случае отсутствия возможности увеличения расхода дутья для отдаления очага горения от стен печи, следует уменьшить диаметр фурм или увеличить их высов.

Для дальнейшего повышения расхода угольной пыли необходимо решить задачу по улучшению газопроницаемости столба шихтовых материалов. Наибольший резерв для снижения перепада давления газа в столбе шихтовых материалов в доменной печи находится в зоне когезии.

Для условий работы доменной печи № 3 полезным объемом 2002 м^3 комбината ЧАО «ММК им. Ильича» произведен расчет для определения расхода ПУТ, при котором не произойдет нарушение ровного хода печи без применения мер по улучшению газопроницаемости зоны когезии. Расчет произведен при условии, что масса железорудных материалов в подаче 50 т, кокса 15 т при отсутствии ПУТ и 12 т при количестве ПУТ 100 кг/т чугуна. Снижение массы кокса в подаче на 3 тонны приводит к снижению высоты коксовых окон на 0,1 м. При 15 тоннах кокса в подаче высота коксовых окон составляет 0,46 м, а при 12 тоннах – 0,36 м. Рудная нагрузка на кокс в печи при снижении массы кокса в указанном интервале возрастает с 3,3 до 4,2 т/т. На рис. 5 (*2)* показано изменение градиента перепада давления газа при изменении расхода ПУТ. Градиент перепада давления газа в доменной печи рассчитан исходя из распределения давления по высоте печи. Распределение давления газа по высоте печи в свою очередь рассчитано при помощи решения дифференциального уравнения движения в неявном виде.

Как видно из рис. 5, с увеличением расхода ПУТ увеличивается перепад давления газа и верхняя граница (прямая *1),* которая ограничивает область оптимальной работы доменной печи. Перепад давления газа в печи возрастает более резко, чем давление материалов в результате увеличения доли более тяжелых железорудных материалов по сравнению с коксом. В результате, при увеличении расхода ПУТ выше определенного количества наступит момент (пересечение линий *1* и *2* рис. 5), когда дальнейшее увеличение его расхода возможно лишь при применении компенсирующих мер. Как указывалось, ранее при увеличении расхода ПУТ может уменьшаться расход дутья. Этот фактор может быть компенсационным. Как показал расчет, для условий доменной печи № 3 доменного цеха ЧАО «ММК им. Ильича» критической величиной расхода ПУТ является 150 кг/т. При снижении расхода дутья до такого уровня, который обеспечит расположение фокуса горения на расстоянии 0,42–0,45 м от фурм, возможно увеличение расхода ПУТ до 170 кг/т чугуна.

Количество ПУТ, которое не будет негативно сказываться на ходе доменной печи, можно определить расчетным методом для конкретных условий.

Переход на технологию выплавки чугуна с вдуванием ПУТ значительно сократил удельный расход кокса, а рудная нагрузка на кокс увеличилась с 3,4 до 4,7. При этом высота слоев кокса сократилась на 26,1 %. Увеличение удельного расхода ПУТ сопровождалось

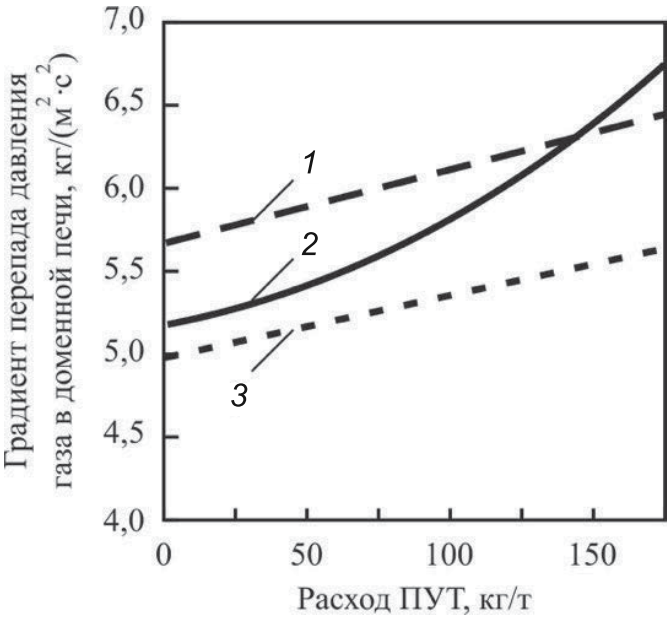

Рис. 5. Градиент перепада давления газа в доменной печи с изменением расхода кокса: *1, 3* – прямые, ограничивающие область оптимальной работы доменной печи по критерию ГДУ; *2* – перепад давления газа в доменной печи

увеличением интенсивности прогара элементов системы охлаждения нижней части шахты, опорного кольца (маратора) и заплечиков (рис. 4). С этой проблемой столкнулись все металлургические предприятия Украины, внедряющие ПУТ-технологию выплавки чугуна. Использование медных холодильников позволяет увеличить срок службы огнеупорной кладки, но тепловая нагрузка на кладку при этом не уменьшается.

Для сохранения системы охлаждения нижней части доменной печи необходимо применять системы загрузки шихты, понижающие интенсивность газового потока в периферийной зоне и способствующие усилению развития газового потока в осевой зоне печи. Кроме снижения тепловой нагрузки на огнеупорную кладку и систему охлаждения доменной печи это позволит значительно увеличить степень использования энергии печных газов. Такие системы загрузки шихты разработаны для доменных печей металлургического комбината им. Ильича [5].

Выводы

Вдувание пылеугольного топлива в горн доменной печи значительно сокращает газопроницаемость столба шихтовых материалов и увеличивает тепловую нагрузку на огнеупорную кладку и систему охлаждения доменной печи.

Для увеличения высоты слоев кокса в столбе шихтовых материалов целесообразно грузить шихту раздельными четырехскиповыми подачами по опыту металлургических комбинатов им. Ильича и «Криворожсталь».

Для снижения тепловой нагрузки на огнеупорную кладку и систему охлаждения доменной печи следует применять системы загрузки шихты, снижающие интенсивность газового потока в периферийной зоне доменной печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Афанасьев З.К.* Резервы эффективности комбинированного дутья в доменных цехах Украины. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 31 с.
2. *Ярошевский С.Л.* Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 16 с.
3. *Кочура В.В., Ярошевский С.Л., Бабич А.И.* Интенсификация сжигания пылевидного топлива в доменной плавке // Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 3–10 июня 2005 г., Варна-Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 53–56.
4. *Зинченко Ю.А., Струтинский В.А.* Освоение технологии вдувания пылеугольного топлива при производстве чугуна на ПАО «ММК им. Ильича» // *Металл и литье Украины*. – 2013. – № 10. – С. 11–14.
5. *Семакова В.Б., Зинченко Ю.А., Шадловский Ю.О.* Вдувание пылеугольного топлива в доменные печи ПАО «ММК им. Ильича» при их загрузке утяжеленными подачами // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2016. – № 3. – С. 18–21.

Поступила 04.09.2018

REFERENCES

1. *Yaroshevskii, S.L., Kuznetsov, A.M., Afanas'ev, Z.K.* (2006). Reserves of efficiency of combined blast in blast-furnace shops of Ukraine. Donetsk: Nord Komp'iuter, 31 p. [in Russian].
2. *Yaroshevskii, S.L.* (2006). Pulverized fuels are a real and effective alternative to natural gas in metallurgy. Donetsk: Nord Komp'iuter, 16 p. [in Russian].
3. *Kochura, V.V., Yaroshevskii, S.L., Babich, A.I.* (2005). Intensification of the combustion of pulverized fuel in blast furnace smelting. International Conference "Quality Strategy in Industry and Education", June 3–10, 2005, Varna-Dnepropetrovsk: Porogi, pp. 53–56 [in Russian].
4. *Zinchenko, Yu.A., Strutinskii, V.A.* (2013). Development of the technology of injection of pulverized coal in the production of pig iron at the PJSC "MMK im. Ilyich". *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 10, pp. 11–14 [in Russian].
5. *Semakova, V.B., Zinchenko, Yu.A., Shadlovskii, Yu.O.* (2016). Injection of pulverized-coal fuel into blast furnaces PJSC "MMK im. Ilyich" at their loading weighted feeds. *Metallurgical and mining industry*, no. 3, pp. 18–21 [in Russian].

Received 04.09.2018

Анотація

В.М. Захарченко[1], канд. техн. наук, гол. доменник, e-mail: vnz1964@gmail.com; **В.П. Руських[2],** канд. техн. наук, доц., зав. кафедри; **М.В. Косолап[3],** начальник доменного цеху

[1]Об'єднання підприємств «Укрметалургпром», Дніпро, Україна
[2]ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь, Україна
[3]ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча», Маріуполь, Україна

Проблеми вдування пиловугільного палива в доменні печі

Впровадження технології з вдуванням пиловугільного палива (ПВП) викликає порушення оптимального технологічного режиму доменної плавки, викликаного зміною температурно-теплового режиму горна і зниженням газопроникності стовпа шихтових матеріалів. Зроблено аналіз зміни технологічних параметрів і теплового стану печі при подачі ПВП. Визначено технологічні та технічні способи збільшення кількості ПВП, що подається в доменні печі.

Ключові слова

Доменна плавка, пиловугільне паливо, кокс, технологічні параметри, критерій газодинамічної стійкості, зона когезії, газопроникність.

Summary

V.N. Zakharchenko[1], Candidate of Engineering Sciences, main blast-furnace operator, e-mail: vnz1964@gmail.com; **V.P. Russkikh[2],** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Department;
N.V. Kosolap[3], Head of Blast-Furnace Shop

[1]Association «Ukrmetallurgprom», Dnipro, Ukraine
[2]SHEI "Priazovsky State Technical University", Mariupol, Ukraine
[3]PJSC «Mariupol Metallurgical Plant named after Ilyich», Mariupol, Ukraine

Problems of blowing pulverized coal into blast furnaces

The introduction of technology with the injection of pulverized coal (PC) causes a violation of the optimal technological regime of blast furnace smelting caused by a change in the temperature and thermal regime of the furnace and a decrease in the gas permeability of the column of charge materials. An analysis was made of the change in the technological parameters and the thermal state of the furnace when the PC was supplied. Technological and technical ways of increasing the amount of PC supplied to blast furnaces have been determined.

Keywords

Blast smelting, pulverized coal, coke, technological parameters, criterion of gas-dynamic stability, zone of cohesion, gas permeability.