

- ния / С.Г. Псахье // Вестник Российской академии наук. – 2013. – Т. 83. – № 5. – С. 398-406.
3. Панин В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 254 с.

Bibliography:

1. Panin V.E. Physical mesomechanics: achievements over two decades of development, problems and prospects / V.E. Panin, Y.V. Grinyayev, S.G. Psakhie // Physical mesomechanics. – 2004. – Vol. 7, h. 1. – P. 25-40. (Rus.)
2. Psakhie S.G. A layered approach to modeling of deformation and fracture / S.G. Psakhie // Bulletin of the Russian academy of sciences. – 2013. – Vol. 83. – № 5. – P. 398-406. (Rus.)
3. Panin V.E. Structural levels of deformation of solids / V.E. Panin, V.A. Likhachev, Y.V. Grinyayev. – Novosibirsk : Nauka, 1985. – 254 p. (Rus.)

Рецензент: В.И. Засельский
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «КНУ»

Статья поступила 22.10.2015

УДК 622.788:669.162

© Чупринов Е.В.¹, Лялюк В.П.², Журавлев Ф.М.³,
Ляхова И.А.⁴, Кассим Д.А.⁵

**РЕЖИМЫ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОБОЖЖЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ
С ОСТАТОЧНЫМ УГЛЕРОДОМ ДЛЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Опробована технологія отримання обожжених окатишей з залишковим вуглеродом в готовому залізородному продукті. Показана ефективність використання більш високої швидкості нагріву висушених окатишей (500°C/хв. замість 100°C/хв.) і швидкості охолодження обожжених окатишей (600°C/хв. замість 100°C/хв.) в окислювальній атмосфері.

Ключевые слова: железорудный продукт, окатиши, остаточный углерод, термоупрочнение, окислительная среда.

Чупринов Є.В., Лялюк В.П., Журавлев Ф.М., Ляхова І.А., Кассим Д.А. Режими термомццнення в окисній атмосфері при одержанні обпалених обкотишів із залишковим вуглецем для доменної плавки. Випробувана технологія отримання обпалених обкотишів із залишковим вуглецем в готовому залізородному продукті. Показана ефективність використання більш високої швидкості нагріву висушених обкотишів (500°C/хв. замість 100°C/хв.) і швидкості охолодження обпалених обкотишів (600°C/хв. замість 100°C/хв.) в окислювальній атмосфері.

Ключові слова: залізородний продукт, обкотиші, залишковий вуглець, термомццнення, окисна середина.

E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, I.A. Lyakhova, D.A. Kassim. Thermo-hardening modes in the oxidizing atmosphere of burnt pellets with residual carbon

¹ ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, lyalyuk.vitalij@mail.ru

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, zhfm@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог

⁵ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог

manufacture for blast furnace melting. Effective modes of green pellets thermostrengthening have been worked out and selected, characteristic property of the pellets being solid fuel rolled up inside them. The use of the obtained material in the blast furnace will result in considerable savings of expensive and scarce coke. The developed technology makes it possible to receive burned pellets with maximum residual carbon in the finished iron ore product. The received results have shown that higher heating rate must be used to heat dried pellets (500°C/min. instead 100°C/min.) and still higher cooling rate to cool the burned pellets (600°C/min. instead 100°C/min.) in an oxidizing atmosphere. Owing to these changes in the process the amount of residual carbon in the finished product increases from 0.7 to 3.5%. Comparative characteristics of the technological parameters of production and metallurgical properties of the produced lumped iron ore (sinter and pellets) and the pellets with residual carbon show, that the developed iron material with residual carbon not only meets all the requirements for the blast furnace melting, but also has better metallurgical properties than the oxidized burned pellets.

Keywords: iron product, pellets, residual carbon, thermostrengthening, oxidizing atmosphere.

Постановка проблеми. Эффективность доменного процесса зависит от качества железорудного сырья. Разработка технологии получения обожженных окатышей с остаточным углеродом позволит получить материал, соответствующий требованиям доменной плавки, и добиться экономии кокса.

Анализ последних исследований и публикаций. Удельный расход кокса является самой главной затратной статьей в калькуляции себестоимости выплавки чугуна в доменных печах [1-7]. На сегодняшний день внедрены технологии частичной (в большей или меньшей степени) замены металлургического кокса в доменной плавке другими видами топлива (твердым, жидким и газообразным), которое является менее дефицитным и менее дорогостоящим. Главные требования к этим топливам заключаются в наличии максимально возможного содержания полезных и минимально – вредных элементов, а также минимальное влияние на газопроницаемость столба шихты в печи при их использовании. Среди таких технологий следует отметить ввод в шихту доменной плавки кускового антрацита, вдувание в фурмы доменной печи пылеугольного топлива, природного и коксового газов, а также мазута [8].

Также, среди технологий, используемых для снижения удельного расхода кокса в доменной плавке, применяется получение окускованных железорудных материалов (агломерат и окатыши), содержащих в своем составе остаточный углерод из введенного и не сгоревшего в них твердого топлива [9-11]. Опытные плавки с использованием этих материалов в доменной шихте показали их полезный эффект [12].

Анализ вышеперечисленных источников показал, что каждая из изученных технологий имеет свои преимущества и недостатки как в подготовке топлива к вводу в доменную печь, так и в его влиянии на технико-экономические показатели доменной плавки.

Цель статьи – отработка режимов получения обожженных окатышей с остаточным углеродом, соответствующих требованиям доменной плавки.

Изложение основного материала. Окускованный железорудный материал с остаточным углеродом обладает несомненным преимуществом, заключающемся в том, что в процессе его термоупрочнения он предварительно частично восстанавливается изнутри за счет газификации закатанного внутрь углерода твердого топлива, а затем при плавке одновременно восстанавливается с поверхности восстановительными газами доменной печи и из центра куска за счет газификации остаточного углерода, что повышает скорость восстановления всего куска и, соответственно, производительность доменной печи. Кроме того, исключается влияние разрушения кусков угля при их термическом нагреве на газопроницаемость столба шихтовых материалов в доменной печи, так как уголь находится внутри агломерата или окатыша. Сложность технологий подготовки окускованного железорудного сырья с остаточным углеродом заключается в двух аспектах: сохранении максимального количества не сгоревшего твердого топлива в окислительной атмосфере при спекании агломерата и обжиге окатышей, а также при их охлаждении; неконтролируемом развитии высоких температур при сгорании твердого топлива внутри материала, приводящее к его расплавлению и нарушению технологического процесса.

Высокотемпературная технология получения окускованного железорудного материала (агломерата или окатышей) с максимальным количеством остаточного углерода внутри него может быть осуществлена при неперменном соблюдении двух основных технологических условий: эффективным накатыванием мелких компонентов шихты на кусочки твердого топлива, являющихся зародышами, с обеспечением необходимой прочности полученных сырых комков (окатышей) и минимальным выгоранием углерода этого твердого топлива в процессе термического упрочнения и охлаждения окускованного материала в газовой атмосфере с разным окислительным потенциалом. Кроме того, скорость выгорания твердого топлива внутри окускованного железорудного материала зависит от его реакционной способности. Минимальную реакционную способность среди углей имеет антрацит, который и рекомендуется для закатывания внутрь железорудного материала [13]. Оптимальность соблюдения указанных технологических параметров производства окускованного материала с остаточным углеродом диктуется как возможной простотой и технологичностью параметров её осуществления, так и экономической целесообразностью процесса.

Как отмечалось выше, неперменным первоначальным условием получения высококачественного окускованного материала с остаточным углеродом является эффективное накатывание и сцепление мелких компонентов шихты, как между собой, так и с поверхностью кусочков твердого топлива размером 1,5-10 мм, которые выполняют роль зародышей для образования прочных комков (сырых окатышей). Испытания проводились в лабораторных условиях, максимально приближенных к промышленным. Сырые окатыши получали в непрерывном режиме, а их термоупрочнение производили в обжиговой чаше.

Для испытаний выделенный антрацит крупностью 0-10 мм обрабатывали натриевым лигносульфонатом по технологии [14] и получали сырые окатыши, соответствующие требованиям последующего их термоупрочнения по гранулометрическому составу и прочностным показателям (табл. 1).

При этом при всех испытанных режимах термоупрочнения сырые окатыши имели практически одинаковые влажность, гранулометрический состав, содержание углерода в шихте и количество закатанного в них (100%) твердого топлива. В процессе термоупрочнения сырых окатышей в разных опытах ступенчато изменяли скорость их нагрева (от 100 до 500°С/мин.) и скорость охлаждения (от 100 до 600°С/мин.) [15]. Максимальная температура обжига и время обжига были выбраны оптимальными и не изменялись во всех опытах, так как в этой зоне формируется равномерность конечного минерального состава во всем объеме окатыша. Содержание кислорода в теплоносителе зоны нагрева зависело от коэффициента избытка воздуха для получения необходимой температуры в зоне при сжигании природного газа и составляло 18-10%, а в зоне обжига – 7-9%. В зоне охлаждения окатыши продувались холодным воздухом, содержащим 21% кислорода. Поэтому, увеличение скорости нагрева и охлаждения позволило сократить время пребывания окатышей в окислительной атмосфере при температурах выше температуры воспламенения твердого топлива и снизить степень выгорания в них углерода твердого топлива с 82,1% до 10,3%. Кроме того, за счет увеличения скоростей нагрева и охлаждения уменьшилось общее время термоупрочнения окатышей, что позволило увеличить производительность обжигового агрегата с 0,87 до 1,67 т/м²·ч и сократить удельный расход газа с 21,3 до 17,9 м³/т. Прочностные характеристики обожженных окатышей с остаточным углеродом и их свойства при восстановлении (прочность, газопроницаемость и усадка слоя) остались аналогичными обычным окатышам, а степень их восстановления возросла (см. табл. 1), за счет газификации углерода, образования СО внутри окатышей и восстановления их изнутри.

Сравнительные технологические показатели производства и металлургические характеристики производимых окускованных железорудных материалов (агломерата и окатышей) и разработанных окатышей с остаточным углеродом показывают (табл. 2), что при производстве последних повысится удельная производительность обжигового агрегата (конвейерной обжиговой машины) и снизится удельный расход энергоресурсов. При этом в них несколько увеличится содержание общего железа (с 62,2-65,8% до 63,5-65,9%) и закиси железа (с 1,3-2,7% до 7,6-18,4%) за счет частичного восстановления оксидов железа изнутри в процессе термоупрочнения сырых окатышей. Исходная прочность и истираемость окатышей с остаточным углеродом практически аналогична традиционным окисленным окатышам, а прочность и истираемость при восстановлении несколько лучше. Ниже и показатели величины усадки слоя и пере-

пада давления газа в слое окатышей при высокотемпературном восстановлении. Выше и степень восстановления окатышей с остаточным углеродом. При этом угол естественного откоса их аналогичен окисленным обожженным окатышам и ниже, чем у агломерата (см. табл. 2).

Таблица 1

Влияние скоростей нагрева и охлаждения при термоупрочнении на характеристики получения обожженных окатышей и их свойства

Показатели термоупрочнения сырых окатышей	Варианты испытаний							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание углерода в шихте, %	0	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Крупность антрацита, мм	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10
Массовая доля влаги в сырых окатышах, %	9,1	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
Количество годного класса в сырых окатышах, %	92,4	93,1	93,1	93,1	93,1	93,1	93,1	93,1
Количество закатанного в окатыши топлива, %	0	100	100	100	100	100	100	100
Скорость нагрева высушенных окатышей от 300 °С до температуры обжига, °С/мин.	100	100	120	180	250	350	400	500
Температура обжига окатышей, °С	1250-1350	1250-1350	1250-1350	1250-1350	1250-1350	1250-1350	1250-1350	1250-1350
Продолжительность обжига, мин.	6	6	6	6	6	6	6	6
Скорость охлаждения обожженных окатышей до 500-700 °С, °С/мин.	100	100	120	150	200	300	400	600
Степень выгорания углерода, %	0	82,1	66,7	51,3	28,2	17,9	12,8	10,3
Содержание остаточного углерода в обожженных окатышах, %	0	0,7	1,3	1,9	2,8	3,2	3,4	3,5
Продолжительность термоупрочнения окатышей*, мин.	27,6	27,6	24,0	19,3	15,8	12,7	11,3	10,1
Удельная производительность обжигового агрегата, т/м ² ·ч	0,87	0,87	0,96	1,12	1,28	1,47	1,51	1,67
Удельный расход газа на термоупрочнение, м ³ /т	21,3	21,3	20,9	20,4	19,7	19,2	18,6	17,9
Прочность на сжатие обожженных окатышей, кг/ок	216	212	213	210	205	201	203	190
Прочность на удар (+5 мм) окатышей, %	96,3	96,1	96,4	96,2	96,0	96,5	96,3	96,1
Истираемость (0-0,5 мм) окатышей, %	2,8	2,9	2,7	3,0	3,1	2,7	2,8	3,2
Прочность при восстановлении (+5 мм), %	86,3	90,7	91,2	92,3	90,9	93,1	91,8	91,4
Истираемость при восстановлении (0-0,5 мм), %	6,7	6,2	5,8	5,4	5,9	5,1	5,6	5,7
Степень восстановления окатышей, %	84,5	85,3	86,1	85,7	86,9	86,2	86,5	87,1

* – включает только нагрев, обжиг и охлаждение окатышей;

** – содержание железа только в железосодержащей части обожженных окатышей.

Таблица 2

Технологические показатели производства и металлургические характеристики окискованных железорудных материалов

Наименование показателей	Промышленный агломерат офлюсованный	Промышленные окатыши офлюсованные и неофлюсованные	Обожженные окатыши по разработанной технологии [15]
Удельная производительность агрегата, т/м ² ·ч	1,1-1,3*	0,9-1,2**	1,3-1,5**
Удельный расход тепла, МДж/т	1947-2452	401-1140	489-1120
Удельный расход электроэнергии, квт·ч/т	43,1-71,3	38,7-69,5	37,4-63,7
Содержание Fe _{общ.} , %	51,2-57,6***	62,2-65,8***	63,5-65,9***
Содержание FeO, %	9,1-15,6	1,3-2,7	7,6-21,4

Продолжение таблицы 2

Содержание SiO ₂ ,%	10,4-9,2	7,7-4,7	1,3-6,9
Содержание остаточного углерода, %	0	0	2,8-3,2
Основность (CaO/SiO ₂) готового продукта, д.ед.	1,2-1,8	0,1-1,25	1,2-1,5
Содержание классов, %:			
60-100 мм	23,7-35,6	0	0
20-60 мм	55,9-34,3	0	0
5-20 мм	12,3-7,8	93,5-97,3	92,9-98,8
0-5 мм	8,1-20,4	4,5-2,7	2,2-3,4
Прочность в барабане, ДСТУ ISO 3271:2005, %:			
на удар (+5 мм)	84,5-57,4	92,4-97,1	93,5-96,4
истираемость (-0,5 мм)	8,3-10,2	5,8-1,5	3,6-2,5
Прочность при восстановлении, ДСТУ ISO 7215:2008, %:			
прочность (+5 мм)	37,8-49,4	69,3-95,8	72,9-93,1
истираемость (-0,5 мм)	10,4-9,8	4,7-2,1	4,2-3,3
Газопроницаемость и усадка слоя при восстановлении, ДСТУ 3205-95:			
усадка слоя, %	15-18	23-67	13-19
перепад давления, Па	68-71	108-154	60-72
Степень восстановления, ДСТУ ISO 7215:2008, %	65,1-82,3	72,8-91,4	89,1-93,8
Угол естественного откоса, град.	38-41	28-32	37-40

- * – рабочая площадь агломашины включает только зону спекания, без зоны охлаждения;
 ** – рабочая площадь обжиговой машины включает зоны сушки, нагрева, обжига и охлаждения;
 *** – содержание железа в железосодержащей части окускованного материала.

Выводы

Таким образом, разработаны технологические режимы термоупрочнения сырых окатышей с закатанным внутрь твердым топливом (антрацитом), позволяющие получить в окислительной атмосфере теплоносителя конвейерной обжиговой машины обожженные окатыши, содержащие остаточный углерод в количестве от 0,7 до 3,5%, что позволит снизить удельный расход кокса в доменной плавке.

Список использованных источников:

1. Лялюк В.П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 1999. – 164 с.
2. Товаровский И.Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 2000. – 420 с.
3. Товаровский И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 2001. – 424 с.
4. Антрацит и термоантрацит в шихте доменной плавки // В.П. Лялюк [и др.]. – Днепропетровск : Пороги, 2008. – 245 с.
5. Донсков Е.Г. Сокращение расхода энергоресурсов при выплавке чугуна / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 382 с.
6. Донсков Е.Г. Управление ходом доменной плавки / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк. – Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 480 с.
7. Металлургия чугуна : учебник для ВУЗов / Е.Ф. Вегман [и др.]. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
8. Коксозамещающие технологии в доменной плавке / В.П. Лялюк [и др.]. – Днепропетровск : Пороги, 2006. – 276 с.
9. А.с. 1188217 СССР, МПК⁴ С 22 В 1/16. Способ производства агломерата / Г.Г. Ефименко, С.П. Ефимов, Б.В. Кушнарев и др. – № 3743399; заявл. 22.05.84; опубл. 30.10.85, Бюл. № 40.
10. А.с. 1602878 СССР, МПК⁵ С 22 В 1/24. Способ получения углеродсодержащих железорудных материалов / М.З. Рогинский, Н.А. Гладков, М.Д. Жембус и др. – № 4183632; заявл. 19.01.87; опубл. 30.10.90, Бюл. № 40.
11. А.с. 1617021 СССР, МПК⁵ С 22 В 1/24. Способ получения железорудных окатышей с ос-

- таточным углеродом / М.З. Рогинский, М.Д. Жембус, С.Г. Шарапов. – № 4651387; заявл. 20.02.89; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.
12. Использование опытных железорудных офлюсованных окатышей с остаточным углеродом в доменной плавке / Д.А. Ковалев [и др.] // Сталь. – 1999. – № 8. – С. 4-9.
 13. Исследование процесса металлизации рудоугольных окатышей / С.Т. Ростовцев [и др.] // Труды института Уралмеханообр. Окучкование железных руд и концентратов. – Свердловск, 1975. – С. 70-77.
 14. Пат. 94772 Україна, МПК С 22 В 1/14. Спосіб виробництва обпалених обкотишів із залишковим вуглецем / Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, І.А. Ляхова, Д.О. Кассім, В.П. Соколова, Є.В. Чупринов. – № 201407549; заявл. 04.07.14; опубл. 25.11.14, Бюл. № 22.
 15. Пат. 95241 Україна, МПК С 22 В 1/14. Спосіб виробництва обпалених котунів із залишковим вуглецем / Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, І.А. Ляхова, Д.О. Кассім, Є.В. Чупринов. – № 201408129; заявл. 17.07.14; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23.

Bibliography:

1. Lyalyuk V.P. Contemporary problems of blast furnace technology / V.P. Lyalyuk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 1999. – 164 p. (Rus.)
2. Tovarovsky I.G. The analysis of parameters and blast furnace processes / I.G. Tovarovsky, V.V. Severnyuk, V.P. Lyalyuk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2000. – 420 p. (Rus.)
3. Tovarovsky I.G. Evolution of the blast furnace / I.G. Tovarovsky, V.P. Lyalyuk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2001. – 424 p. (Rus.)
4. Anthracite and thermoanthracite in the charge of blast furnace smelting // V.P. Lyalyuk [et al.]. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2008. – 245 p. (Rus.)
5. Donskov E.G. Reducing energy consumption in the smelting of iron / E.G. Donskov, V.P. Lyalyuk. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 382 p. (Rus.)
6. Donskov E.G. Controlling the blast furnace / E.G. Donskov, V.P. Lyalyuk. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 480 p. (Rus.)
7. Ironmaking : textbook for universities / E.F. Wegman [et al.]. – М. : IKTS «Akademkniga», 2004. – 774 p. (Rus.)
8. The substituents of coke technologies in the blast furnace / V.P. Lyalyuk [et al.]. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2006. – 276 p. (Rus.)
9. Inventor's certificate 1188217 USSR, IPC⁴ C 22 B 1/16. A method of production of agglomerate / G.G. Efimenko, S.P. Efimov, B.V. Kushnarev et al. – № 3743399; filed 22.05.84; publication 30.10.85, Bull. № 40. (Rus.)
10. Inventor's certificate 1602878 USSR, IPC⁵ C 22 B 1/24. The process for producing carbon-containing iron materials / M.Z. Roginskii, N.A. Gladkov, M.D. Zhembus et al. – № 4183632; filed 19.01.87; publication 30.10.90, Bull. № 40. (Rus.)
11. Inventor's certificate 1617021 USSR, IPC⁵ C 22 B 1/24. A method of producing iron ore pellets from residual carbon / M.Z. Roginskii, M.D. Zhembus, S.G. Sharapov. – № 4651387; filed 20.02.89; publication 30.12.90, Bull. № 48. (Rus.)
12. The use of experienced iron ore fluxed pellets with a residual carbon in the blast furnace / D.A. Kovalev [et al.] // Steel. – 1999. – № 8. – P. 4-9. (Rus.)
13. Investigation of the ore metallization-coal pellets / S.T. Rostovtsev [et al.] // Proceedings of the institute of Uralmekhanobr. Agglomeration of iron ores and concentrates. – Sverdlovsk, 1975. – P. 70-77. (Rus.)
14. Pat. 94772 Ukraine, IPC C 22 B 1/14. Method of production of burned pellets with residual carbon / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, I.A. Liakhova, D.A. Kassim, V.P. Sokolova, E.V. Chuprinov. – № 201407549; filed 04.07.14; publication 25.11.14, Bull. № 22. (Ukr.)
15. Pat. 95241 Ukraine, IPC C 22 B 1/14. Method of production of burned pellets with residual carbon / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, I.A. Liakhova, D.A. Kassim, E.V. Chuprinov. – № 201408129; filed 17.07.14; publication 10.12.14, Bull. № 23. (Ukr.)

Рецензент: А.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «КНУ»

Статья поступила 16.10.2015