

Список использованных источников:

1. Исследование полидисперсного течения в форсунке для подачи пылеугольного топлива в доменную печь / В.С. Волошин [и др.] // *Металл и литьё Украины*. – 2013. – №10. – С. 15-20.
2. Волошин В.С. Влияние концентрации угольного порошка на сопротивление частиц в форсунке доменной печи / В.С. Волошин, Ю.А. Зинченко, Р.Д. Куземко // *Металл и литьё Украины*. – 2013. – №12. – С. 28-36.
3. Оценка доли выгорания частиц пылеугольного топлива в фурменном очаге / В.В. Калинин [и др.] // *Металл и литьё Украины*. – 2013. – №12. – С.16-19.
4. Исследование превращения вдуваемых углей и других порошков в шахтных печах / А.И. Бабич [и др.] // *Труды международной научно-технической конференции «Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна»* Донецк: УНИТЕХ. – 2006. – С. 181-192.
5. Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами / В.В. Калинин [и др.] // *Металл и литьё Украины*. – 2013. – №11. – С.14-24.

Bibliography:

1. Study polydisperse flow in the nozzle for feeding pulverized coal into blast furnace / V.S. Voloshyn [et al.] // *Metal casting and Ukraine*. - 2013. - №10. - P. 15-20. (Rus.)
2. Voloshyn V.S. Influence of concentration of coal powder resistance of the particles in the nozzle blast furnace / V.S. Voloshyn, Yu.A. Zinchenko, R.D. Kuzemko // *Metal casting and Ukraine*. - 2013. - №12. - P. 28-36. (Rus.)
3. Estimate of the fraction of particles burning pulverized coal in tuyere hearth / V.V. Kalinchak [et al.] // *Metal casting and Ukraine*. - 2013. - №12. - P. 16-19. (Rus.)
4. Study of injected coal conversion and other powders in blast furnaces / A.I. Babich [et al.] // *Proceedings of the International scientific and technical conference "Pulverized coal - alternative to natural gas in iron smelting"* Donetsk: Unitech. - 2006. - P. 181-192. (Rus.)
5. High-mass transfer and chemical kinetics of carbon particles with gases / V.V. Kalinchak [et al.] // *Metal and casting Ukraine*. - 2013. - №11. - P. 14-24. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.05.2014

УДК 622.788

© Кривенко С.В.¹, Божков Г.Г.²

СТРУКТУРА АГЛОМЕРАТОВ РАЗЛИЧНОЙ ОСНОВНОСТИ

Исследовано влияние содержания различных компонентов в агломерате на его прочность, восстановимость и микроструктуру. Подобран оптимальный состав агломератов, обеспечивающий максимальную эффективность использования газов в доменной печи.

Ключевые слова: агломерат, основность, восстановимость, микроструктура, прочность.

Кривенко С.В., Божков Г.Г. Структура агломератів різної основності. Досліджено вплив вмісту різних компонентів у агломераті на його міцність, відновлю-

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь

² асистент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь, summersky@mail.ru

ваність і мікроструктуру. Підібрано оптимальний склад агломератів, що забезпечує максимальну ефективність використання газів у доменній печі.

Ключові слова: агломерат, основність, відновлюваність, мікроструктура, міцність.

S.V. Krivenko, G.G. Bozhkov. The structure of sintered ore of various basicity. The influence of the content of the various components in the sintered ore in its strength, recoverability and microstructure. Optimal composition of sintered ore for maximum efficiency use of the blast furnace gas was specified.

Keywords: sinter, basicity, recoverability, microstructure, strength.

Постановка проблеми. Агломерат представляет собой сложную композицию, состоящую из большого числа компонентов, каждый из которых оказывает влияние на его свойства. Некачественный агломерат, разрушаясь, ухудшает газодинамику столба шихтовых материалов в шахте доменной печи. Образование мелких фракций при транспортировке и нагреве, температурный интервал размягчения и восстановимость агломерата оказывают существенное влияние на расход кокса при производстве чугуна. Поэтому актуальным является подбор параметров агломерационного процесса, наиболее удовлетворяющего требованиям доменной плавки.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-3] отмечается падение холодной прочности агломерата независимо от состава шихты и условий спекания в интервале основности 1,15 – 1,50. Основные причины снижения прочности – это сложный минералогический состав агломерата, недостаточное взаимодействие компонентов шихты и повышенное содержание двухвалентного силиката Ca_2SiO_4 .

Большая часть агломератов наших фабрик имеет основность в этом интервале. Одним из вариантов решения проблемы является производство двух агломератов разной основности, не попадающих в интервал минимальной прочности.

Производству нескольких видов агломератов в Украине препятствовала как фиксированная технологическая схема аглофабрик, не позволявшая организовать выпуск нескольких видов агломератов, так и некоторое усложнение аглопроцесса.

Цель статьи – подбор оптимума по восстановимости и прочности агломератов с целью достижения максимальной эффективности агломерационного и доменного производства.

Изложение основного материала. При спекании агломерата по высоте слоя происходят взаимосвязанные процессы минералообразования в твердых фазах, образования жидких фаз, а также пропитки жидкими фазами твердых частиц и химическое взаимодействие с ними.

Взаимодействия твердых оксидов CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 и других, входящих в состав аглошихты, происходит при температурах 500 – 1100°C. Важным результатом процесса взаимодействия является подготовка к образованию жидкой фазы, которая растворяет в себе остальную массу шихты. В процессе спекания нагрев шихты до температур плавления происходит за промежуток времени 0,5 – 1 мин, а окончательное выравнивание концентраций с получением конечного продукта, состав которого отвечает массе реагирующих веществ, требует более продолжительного времени. Поэтому температура и продолжительность взаимодействия твердых фаз, существенно влияют на выход продукта реакции.

Появление жидких фаз происходит в зоне горения при температуре выше 1150°C. Их количество и вязкость определяют степень пропитки остальной массы шихты и зависят от температурного уровня в зоне горения и длительности периода существования жидких фаз. Температуры в зоне горения 1250 ÷ 1350°C обеспечивают степень восстановления и диссоциации гематита с образованием 10 ÷ 15% FeO . При температурах ниже 1250°C структура агломерата в основном представлена гематитом и кварцем. В результате наибольшее количество фаялита, железокальциевых оливинов, образующихся в твердой фазе, попадает в конечную структуру агломерата, не проходя через жидкое состояние [4]. В этом виде они не могут играть роль связки, что определяет низкую механическую прочность агломерата.

Жидкие фазы в первую очередь образуются на поверхности гранул, где начинает гореть топливо шихты. Далее горение топлива распространяется внутрь гранул, что способствует появлению жидких фаз в количестве, достаточном для пропитки гранул, заполнения пор и образования прочных связывающих менисков. При перемещении зоны горения жидкие фазы кри-

сталлизируются, препятствуя передаче кислорода для горения топлива. Поэтому в агломерате присутствует остаточный углерод.

С изменением скорости передвижения зоны горения в слое происходят изменения температурных уровней процессов и их продолжительность. Несогласованность процессов приводит к ухудшению прочности агломерата. Поэтому необходим подбор таких параметров спекания и компонентного состава, которые бы обеспечили образование однородной структуры агломерата с отсутствием крупных пор и объемов, непропитанных жидкой фазой. Наиболее объективные данные для оптимизации параметров процесса могут быть получены при изучении структуры шлифов агломерата под микроскопом.

Для анализа микроструктуры агломерата в лабораторных условиях были произведены спекания агломератов различной основности. Особое внимание уделялось поддержанию фракционного состава частиц путём додрабливания крупных фракций и стабилизации качества окомкования. Расход топлива осуществлялся с учётом затрат тепла, необходимого на обжиг известняка. Спекание проводили в агломерационной чаше диаметром 150 мм и ёмкостью 5 кг аглошихты для условий, близких к производственным ПАО «АрселорМиталСтил». Скорость спекания, производительность аглоустановки и выход годного агломерата соответствовали достигнутым показателям промышленного производства.

В табл. 1 приведено содержание компонентов в шихте для получения агломератов необходимой основности. Для различных спеканий изменяли содержание железосодержащих компонентов и флюсующих. При этом определяли химический состав агломерата, время спекания $\tau^{сн}$, выход годного агломерата ВГ (фракции +5 мм и +10 мм), барабанный показатель БП, восстановимость R и относительное увеличение производительности $\Delta П$. Высота слоя была постоянной и составила 200 мм. Разрежение под слоем составило 10 кПа.

Таблица 1

Содержание компонентов в шихте

№	Время спекания, мин	Дозировка, %						
		Руда	Концентрат	Известняк	Известь	Колошниковая пыль	Топливо	Возврат
1	12,5	10,36	41,44	6,91	1,24	4,14	4,14	31,77
2	18,5	0	40,05	20,03	1,20	4,01	4,01	30,71
3	11	10,01	30,04	20,03	1,20	4,01	4,01	30,71
4	9,75	10,03	33,42	6,68	11,10	4,01	4,01	30,75
5	13	10,01	23,36	26,70	1,20	4,01	4,01	30,71
6	7,5	0	43,45	6,68	11,10	4,01	4,01	30,75
7	12,5	0	29,68	19,79	10,95	3,96	5,28	30,34
8	12,5	0	16,98	43,48	11,28	0	6,52	21,74

Управление основностью В агломерата для спеканий 1-3 и 5 осуществляли за счёт добавления известняка до 26,7%. При этом содержание железа в агломерате снижалось. Поэтому для получения высокоосновных агломератов со значениями $B \geq 2,5$, железная руда из состава агломерационной шихты была заменена концентратом (спекания 6 – 8). Одновременно для улучшения комкуемости увеличено количество извести.

В связи с ограниченностью массы пробы механическую прочность агломерата определяли в лабораторном барабане, обеспечивающем репрезентативность оценки прочности в барабане, соответствующем требованиям ГОСТ 17137-77. Восстановление агломератов выполнялась газообразным восстановителем - водородом, температура восстановления – 800°C, длительность восстановления - 40 мин., определялась на соответствующей установке согласно ГОСТ 17212-84.

В таблице 2 приведены химический состав, содержание мелочи в нем, механическая прочность и восстановимость R полученного агломерата.

Были получены агломераты основностью от 0,98 до 8,00 ед.

Наихудшими показателями спекания обладают агломераты основностью $B = 1,47$ (базо-

вый опыт №2). Такие агломераты спекают на аглофабрике ПАО «АрселорМиталСтил». Лучшими прочностными характеристиками обладают агломераты с основностью 2,0-3,0. Их восстановительная способность остаётся достаточно высокой - 54-67%, хотя и имеет существенную тенденцию к снижению. Максимально достигнутая восстановимость составила 69,3% при основности 2,32 (опыт №4). В опыте №6 известняк заменили известью, что положительно отразилось на комкуемости шихты и производительности процесса спекания. Следует также отметить некоторые улучшения показателей спекаемого агломерата относительно базового при снижении основности до $B = 0,98$.

Таблица 2

Результаты спеканий агломерата

№	Содержание в агломерате компонентов, %						B	ВГ, %		БП, %		R, %	ΔП, %
	FeO	Fe	MgO	SiO ₂	CaO	Mn		+5 мм	+10 мм	+5 мм	+10 мм		
2	14,40	52,50	1,76	8,45	12,40	0,11	1,47	57,40	46,20	50,00	18,90	53,20	0,00
3	13,20	51,40	1,87	8,85	13,70	0,09	1,55	66,80	28,30	56,10	23,40	67,31	95,72
4	12,80	51,20	1,24	7,50	17,40	0,09	2,32	94,30	91,50	76,10	47,10	69,27	211,72
5	11,80	48,20	2,34	7,90	19,00	0,08	2,40	76,90	71,60	82,80	70,10	57,98	90,65
6	16,40	56,90	1,20	7,00	17,50	0,08	2,50	92,48	85,95	87,70	30,80	62,47	297,42
7	14,20	39,40	2,40	7,19	23,00	0,09	3,20	94,70	91,30	81,90	68,10	54,26	82,21
8	7,60	20,02	2,93	7,18	57,40	0,08	8,00	85,90	74,10	78,70	46,70	54,91	144,17

ΔП – изменение производительности с учетом времени спекания и выхода годного агломерата по фракции более 5 мм.

На рисунке 1 представлена микроструктура агломератов основностью 0,98, 1,47 и 1,55, спекание №1, 2, 3 соответственно.

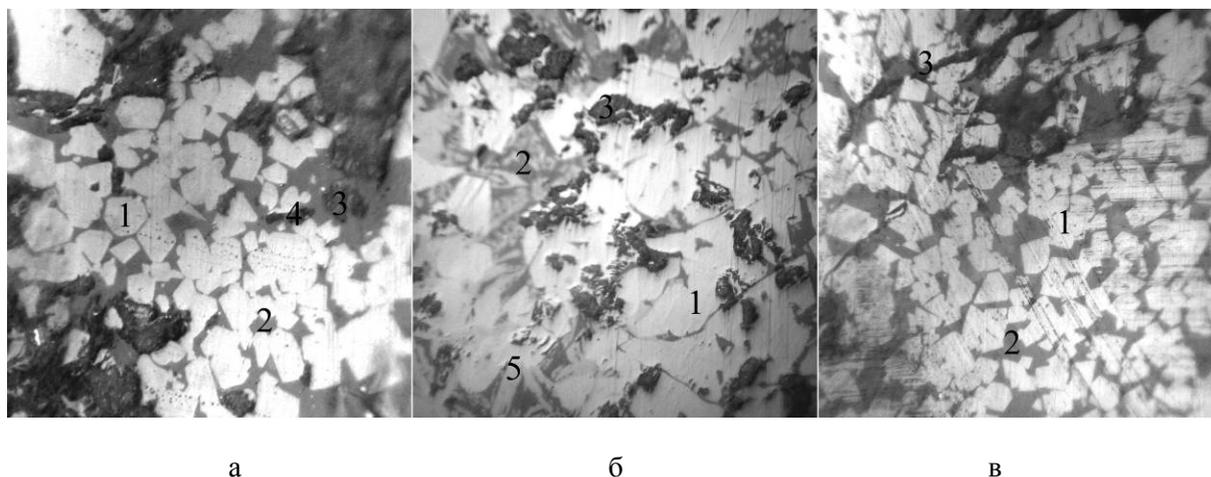


Рис. 1 – Участки микрошлифов (отраженный свет $\times 200$) агломерата для спеканий а – №1; б – № 2; в – № 3: 1 – магнетит, 2 – ферриты Ca, 3 – силикаты Ca, 4 – кварц, 5 – скелетные образования гематита в шлаковой фазе

На рис. 1б, агломерат №2, видно, что в структуре в значительном количестве присутствуют крупные микропоры размером более 2 – 70 мкм, а также гранулы, не пропитанные связующим веществом. Такая структура агломерата обусловлена тем, что в зоне горения топлива не обеспечивается образование жидких фаз в достаточном количестве. Прочность такого агломерата очень низкая.

Полученные результаты объясняются в большей мере изменением минералогической

структуры агломерата. Фаялит, образующийся в значительных количествах в низкоосновных и обычных агломератах, повышает прочность агломерата, одновременно понижая восстановимость, однако рост основности агломерата приводит к практическому его исчезновению уже при основности CaO/SiO_2 близкой к 1,0, и замене его силикатами кальция $\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2$ и железокальциевыми оливинами. Для базового спекания увеличение извести в спекаемой шихте, содержащей повышенное количество SiO_2 с железной рудой, приводит к образованию минералов с повышенной температурой плавления. Так, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ плавится при температуре 1478°C , а $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ – при 1475°C и $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - при 1540°C . Кроме того, двухкальциевый силикат при 675°C переходит из β -фазы в γ -фазу с увеличением объёма на 12 %, вызывающего разрушение агломерата. Агломерат получен непрочный и трудновосстановимый.

Исходя из диаграмм [5, с. 166] при увеличении основности B более 2,0 в агломерате увеличивается доля железокальциевых оливинов $0,5\text{CaO} \cdot 1,5\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$. Их плавление происходит при температурах - 1130°C и 1210°C соответственно. Эти минералы лучше восстанавливаются и их появление способствует образованию достаточного количества жидких фаз.

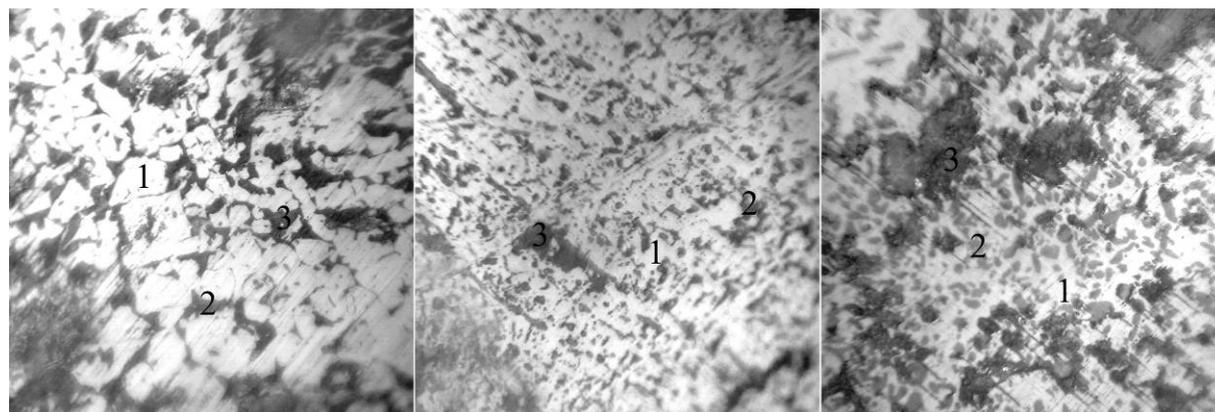
На рисунке 2 представлена микроструктура агломератов основностью 2,32, 2,40 и 2,50, спекание №4, 5, 6 соответственно.

Для спеканий №№ 4-6 характерно образование ферритов кальция $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, имеющего восстановимость водородом уже при 700°C на уровне 76,4%. Это способствует высокой восстановимости и хорошей прочности аглоспека. Содержание железа в таком агломерате невысокое.

Температурный уровень процесса для спекания №5 был недостаточным, из-за чего структура агломерата представляет собой отдельные мелкие гранулы не пропитанные связующим веществом. Такой агломерат легко разрушается.

Снижение содержания железной руды и увеличение доли концентрата в шихте способствует увеличению образования феррита кальция $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, плавящегося при 1230°C . Двухкальциевый феррит $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ обладает худшими восстановительными свойствами - 20,6%. Поэтому восстановимость агломерата несколько ухудшается.

Рост основности более 4,5 приводит к превалированию ферритов кальция по всему массиву аглофлюса. Поэтому прочность агломерата снижается. Это вызвало необходимость увеличения расхода топлива шихты. Однако пористость такого агломерата увеличивается и восстановимость повышается.



а

б

в

Рис. 2 – Участки микрошлифов (отраженный свет $\times 200$) агломерата для спеканий а – №4; б – № 5; в – № 6: 1 – магнетит, 2 – ферриты Ca, 3 – силикаты Ca

На рисунке 3 представлена микроструктура агломератов основностью 3,20 (рис. 3а) и 8,00 (рис. 3б), спекание №7 и 8 соответственно.

Для данных агломератов характерна более плотная и однородная структура, большое количество мелких (менее 2 мкм) микропор, которые могут играть роль «барьера» препятствующую

щего распространению микротрещин в агломерате, также способствуют упрочнению агломерата. Агломерат основностью 3,20 имеет очень хорошие показатели прочности, для агломерата основностью 8,00 характерно снижение прочности из-за наличия в структуре агломерата неусвоенной извести, которая приводит к разрушению крупных кусков агломерата, однако, показатель барабанной пробы по выходу фракции +5 мм составил 78,4%, и эта фракция имеет очень высокую прочность, дальнейшее её разрушение требует значительных механических воздействий.

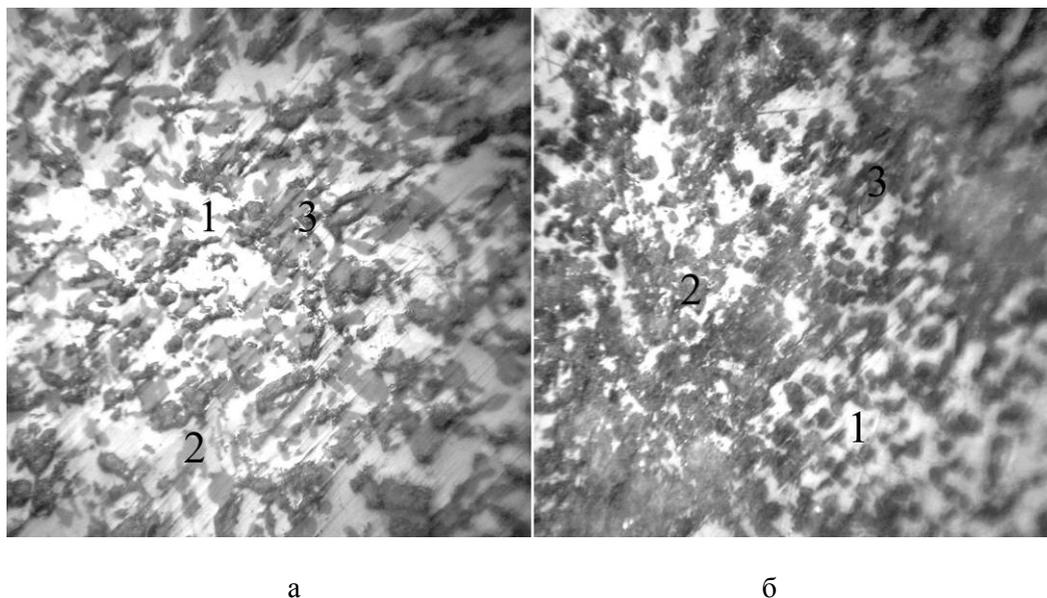


Рис. 3 – Участки микрошлифов (отраженный свет $\times 200$) агломерата для спеканий а – №7; б – № 8: 1 – магнетит, 2 – ферриты Са, 3 – силикаты Са

Время спекания в среднем составило 11-13 минут. Опыт №2 – 18,5 мин из-за избытка влаги. Время спекания в опытах №4 (основность 2,32) и №6 (основность 2,5) составило 9,75 и 7,5 мин соответственно, при этом увеличение производительности с учётом выхода годного агломерата по сравнению с базовым спеканием составило 211 и 297% соответственно. В промышленных условиях увеличение производительности будет не столь значительным – в эксперименте проводилось тщательное перемешивание и додрабливание крупных фракций компонентов шихты, однако, тенденция сохранится.

Дальнейшие исследования следует вести в направлении более полного выявления металлургических свойств агломератов высокой основности, путём определения их горячей прочности и упрощении технологии их получения с целью адаптации полученных результатов к производственным условиям.

Выводы

В структуре агломератов основностью 2,0-2,5 преобладают магнетит, ферриты кальция и силикаты кальция, стекло практически отсутствует. Такие агломераты обладают восстановимостью 62,5-69,3% и прочностью 76,1-87,7%.

С учётом высокой прочности, хорошей восстановимости и производительности, следует рекомендовать к производству агломераты основностью 2,0-2,5.

Список использованных источников:

1. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1 - 3,1 в условиях ММК / Т.Я. Малышева [и др.] // Сталь. – 2007. – №2. – С. 19-22.
2. Свойства агломертов с основностью 0,6 – 3,4 / С.Б. Федоренко [и др.] // Металлург. – 1970. – №9. – С. 3-5.
3. Утков В.А. Высокоосновной агломерат / В.А. Утков. – М. : Металлургия, 1977. – 156 с.

4. Ефименко Г.Г. Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – Киев : Вища школа, 1981. – 496 с.
5. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман [и др.]. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.

Bibliography:

1. Mechanism of mineralization and metallurgical properties of the agglomerates basicity 1.1 – 3.1 under ММК / Т. Malysheva [etc.] // Steel. – 2007. – №2. – P. 19-22. (Rus.)
2. Properties of sinter with a basicity of 0.6–3.4/ N.V. Fedorenko [etc.] // Metallurgist. – 1970. – №9. – P. 3-5. (Rus.)
3. Utkov V. Highly basic sinter / V. Utkov. – М. : Metallurgia, 1977. – 156 p. (Rus.)
4. Efimenko G. Ironmaking / G. Efimenko, A. Gimmelfarb, V. Levchenko. – Kiev : Visha shkola, 1981. – 496 p. (Rus.)
5. Ironmaking / E. Vegman [etc.]. – М. : Akademkniga, 2004. – 774 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 09.04.2014

УДК 669.162.263.23.004.67

© Липунов С.А.*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ
ЗОНЫ КОГЕЗИИ**

В статье рассмотрены теоретические основы газодинамики доменного процесса. В работе проведено экспериментальное исследование газопроницаемости зоны когезии.

Ключевые слова: зона когезии, доменная печь, газодинамика, физическая модель, давление, скорость движения газа.

Липунов С.О. Экспериментальне дослідження газопроницності зони когезії. У статті розглянути теоретичні основи газодинаміки доменного процесу. В роботі проведено експериментальне дослідження газопроницності зони когезії.

Ключові слова: зона когезії, доменна піч, газодинаміка, фізична модель, тиск, швидкість руху газу.

S.O. Lipunov. Experimental research of gas permeability within cohesion area. In the article research theory of gas dynamics in blast furnace. The work presents an experimental research of gas permeability within the cohesion area.

Keywords: area of cohesion, blast furnace, gas dynamics, physical model, pressure, gas velocity.

Постановка проблемы. Газопроницаемость столба шихтовых материалов в доменной печи является фактором лимитирующим производительность печей. Столб шихтовых материалов не однороден. Он состоит из «сухой» части, «мокрой» и зоны когезии. Наибольшее сопротивление прохождению газов оказывает зона когезии. Зона когезии это область в доменной печи в которой материалы из твердого состояния переходят в пластичное. Так как доменная печь это агрегат непрерывного действия изучение процессов протекающих в ней затруднено. Изучение газодинамики возможно при помощи экспериментальных установок.

Анализ последних исследований и публикаций. Научно-практические исследования

* аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,
lipunov-sergei@mail.ru