

А.С.Нестеров, к.т.н., с.н.с., зав. отделом; ORCID 0000-0002-0183-0327

Л.И.Гармаш, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9540-3037

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЗА СЧЕТ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе отмечено, что при освоении технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) на металлургических предприятиях Украины необходимо интенсифицировать работы, в том числе, и научно-исследовательские, в направлении повышения качественных характеристик агломерата, стабильности его химического состава и прочностных параметров. Проведен анализ качества железорудного сырья, применяемого в агломерационном производстве Украины и зарубежных стран. Приведены требования международных и отечественных стандартов к качеству сырья и топлива, обеспечивающие вдувание в горн больших количеств ПУТ. Описана методика определения качества сырья, разработанная в ИЧМ. Приведены результаты исследования по этой методике качества железорудного сырья. На основании анализа результатов проведенных исследований для топливно-сырьевых условий предприятия были разработаны требования к качеству гранулированных железорудных отходов и их рациональному количеству в составе агломерационной шихты, а также отработан процесс производства гранул. Разработаны рекомендации по использованию в агломерационной шихте части гранулированных компонентов вторичных отходов, что позволило повысить содержание вторичных ресурсов в шихте. В результате стабилизирован химический состав агломерата, улучшена его прочность, сокращен выход агломерата второго сорта, уменьшен вынос колошниковой пыли и расход кокса. Повышение качества агломерата и рациональное распределение шихтовых материалов по сечению колошника доменной печи позволяет обеспечить самообновление защитного гарнисажа, сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна, уменьшить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна. Разработанные мероприятия позволяют повысить конкурентоспособности продукции, даже при дополнительных затратах на подготовку агломерационной шихты к спеканию.

Ключевые слова: доменная печь, качество железорудного сырья, методика исследования, агломерат, вторичное железорудное сырье, гранулирование, спекание

Ссылка для цитирования: *Нестеров А.С., Гармаш Л.И.* Повышение эффективности доменной плавки за счет улучшения качества железорудных материалов. //«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вып.33. – С.43-60. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-43-60

Состояние вопроса. Интенсификация доменного процесса предъявляет все более жесткие требования к свойствам железорудного сырья (ЖРС) и топлива. Ведущие мировые металлургические предприятия в свое время пошли по пути повышения качества сырья и в

настоящее время используют в доменной плавке агломерат, окатыши и кокс высокого качества, что позволяет поддерживать стабильность технологического режима плавки и достигать лучших технико-экономических показателей работы доменных печей. Это стало мощным фундаментом совершенствования технологии и позволило без значительных осложнений перейти к технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) со значительным сокращением расхода кокса.

Для компенсации значительного снижения доли кокса в шихте и обеспечения полного сгорания ПУТ в фурменных зонах необходимо реализовать несколько довольно дорогостоящих мероприятий [1]:

- повысить температуру дутья до 1100-1300°C и увеличить содержание в нём кислорода до 25-33%;
- увеличить прочность железорудной шихты и уменьшить содержание в ней мелочи до 1-5%;
- повысить горячую прочность кокса до 60-70%;
- обогатить железорудную шихту и снизить основность шлака до 1-1,15 ед. с целью оптимизации его свойств и снижения выхода до 200-300 кг/т чугуна;
- ограничить приход серы и щелочей с шихтой.

На VIII Международном доменном конгрессе (2016 г.) отмечалось, что при освоении технологии вдувания ПУТ на предприятиях Украины и России необходимо интенсифицировать работы, в том числе, и научно-исследовательские, в направлениях [2]:

- повышения качественных характеристик агломерата по стабильности химического состава и прочностным параметрам;
- повышения качественных характеристик кокса по прочностным параметрам;
- подбора углей для приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи.

Аналогичные выводы были сделаны и на ежегодном совещании доменщиков Украины в 2017 г. При реализации технологии вдувания ПУТ на отечественных предприятиях особо следует учесть два важных фактора [3]:

- необходимость доведения качества украинских железорудных материалов, в первую очередь, окатышей до лучших мировых показателей по содержанию железа и прочности;
- отрицательное влияние окатышей на стойкость футеровки и системы охлаждения, приводящее к сокращению длительности кампании доменных печей.

Улучшения качества ЖРС невозможно достичь без повышения степени его обогащения и кардинального обновления агломерационного производства. Все украинские аглофабрики построены еще в 50-х годах

прошлого столетия, на сегодня их моральный и физический износ достигает 100%. Высокое содержание мелочи в железорудном сырье приводит к снижению эффективности работы доменной печи. Вследствие нестабильности сырья по богатству железом, основности и горячей прочности возрастает количество перешихтовок, усиливается колеблемость теплового и шлакового режимов, что в дальнейшем вызывает потерю производительности и перерасход кокса [4]. Известно, что:

- повышение содержания Fe в шихте на 1% приводит к уменьшению расхода кокса на 1,5-2,5%;
- снижение колебаний содержания Fe в агломерате на 0,5-1% обеспечивает снижение удельного расхода кокса на 7-10 кг/т чугуна;
- повышение эффективности грохочения материалов на 1% позволяет снижать расход топлива в доменном процессе на 0,8-1%;
- каждый выведенный из железорудной шихты 1% фракции 0-5 мм может привести к увеличению производительности печи на 1% при снижении расхода кокса на 0,5 %.

В табл. 1 показана динамика изменений в последние годы показателей качества агломерата (в среднем по предприятиям «Укрметаллургпром»). Самые большие колебания наблюдаются по основности (около 5% отн.), колебания значений количества фракции 0-5 мм постепенно снижаются, по Fe за эти годы – среднее содержание около 54,3%, разброс около 1% отн.

Таблица 1 – Показатели качества агломерата (ср. на предприятиях «Укрметаллургпром»).

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Feобщ, %	53,63	53,98	54,86	54,91	55,06	54,04	53,83	54,0	54,09
Фр.0-5 мм	15,58	15,48	13,26	13,21	12,96	12,81	12,81	12,61	11,75
CaO/SiO ₂	1,303	1,342	1,276	1,267	1,244	1,351	1,414	1,418	1,407

Для условий украинских предприятий одной из основных причин недостаточной эффективности технологии ПУТ является качество сырья и кокса [5]. Для сравнения в таблице 2 приведены показатели качества агломерата и окатышей на украинских и зарубежных предприятиях.

Сравнение характеристик украинского и зарубежного ЖРС показывает, что только за счет повышения его качества украинские производители при выплавке чугуна могут добиться сокращения ~10% условного топлива.

Технология дувания ПУТ кардинально повышает требования к коксу, поскольку его низкое качество не обеспечивает требуемой газопроницаемости столба доменной шихты, особенно в зоне высоких температур. Гетерогенные включения повышают вязкость и плавкость промежуточных и конечных доменных шлаков, в результате чего

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 *«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33*

нарушается ровность хода печи, затрудняется переход серы из металла в шлак, ухудшается дренажная способность продуктов плавки в горне доменной печи [6-7].

Таблица 2 – Показатели качества агломерата и окатышей на украинских и зарубежных предприятиях.

Параметры	Обозначения	Агломерат		Окатыши	
		Украина	Ведущие мет. компании	Украина	Ведущие мет. компании
Химический состав, %	Fe	54,09	60,68	62,57	66,7
	FeO	14,8	12,11	2,0	1,5
	SiO ₂	9,2	4,72	6,55	3,2
	CaO	11,44	6,54	2,49	1,12
	MgO	1,5	2,2	0,9	0,22
	TiO ₂	-	0,5	-	0,05
	CaO/SiO ₂	1,24	1,39	0,35	0,35
Свойства					
Барабан, %	Б +5	66,8	82,42	91,2	94,9
	Б -0,5	6,4	1,5	5,8	3,6
ИСО 4700	прочность, кг/ок	-	-	220	238
ИСО 4695	dR/dt		1,2		0,9
ИСО 46961, %	RDI +6,3	39,6	52,5	-	91,7
	RDI - 3,15	-	19,05	-	4,8
	RDI - 0,5	12,2	5,0	8,8	4,8
ИСО 7215, %	Rf	52,88	54,84	47,8	45,6
ИСО 7992	dH 80	н.д.	0,86	н.д.	н.д.
	dR/dt	н.д.	1,23	н.д.	0,9
	t, мин.	н.д.	70,05	н.д.	н.д.
ИСО 13930,%	LTD + 6,3	24,8	33,93	56,4	76,1
	LTD - 3,15	н.д.	32,78	н.д.	16,1
	LTD - 0,5	24,6	12,03	18,2	10,4
Расчетные высокотемпературные свойства					
Обобщенный показатель качества ПК	L - 0,5, %	14,6	8,0	8,0	5,82
	Wk/Wl, ед.	2,2	2,1	1,9	2,18
	Tnf, °C	1340	1472,7	1320	1365
	M ost., %	7	28	9	7,8
	FeO п.ш., %	18	5,2	42,1	35,75
	M п.ш., %	22	4,0	32,9	26,8
	Пк., балл	11,23	22,7	13,8	23,2

Современные требования к качеству сырья и кокса при вдувании ПУТ представлены в табл. 3-4. Metallургические свойства железорудных материалов и кокса, используемых в аглодоменном производстве, определяются международными (ISO) и отечественными (ГОСТ/ДСТУ) стандартами качества. Оценку качества сырья обычно осуществляют по химическому составу, содержанию фракции -5,0 мм и холодной прочности по ГОСТ15137-77 [8]. Эти показатели существенно влияют на газодинамические свойства столба шихтовых материалов в рабочем объеме доменной печи, однако не в полной мере отражают особенности физико-химических процессов.

Таблица 3 – Показатели качества агломерата, обеспечивающие требуемый уровень вдувание в горн больших количеств ПУТ.

Показатели качества агломерата	Уровень
Допустимое отклонение содержания железа от среднего, %	±0,5
Допустимое отклонение от среднего по основности, ед.	±0,05
Допустимое отклонение от среднего содержания FeO, %	±1,0
Содержание фракции -5 мм в скиповом агломерате	≤5,0
Выход фракции +5 мм при испытаниях на прочность по ГОСТ 15137-77, %	≥80,0
Выход фракции +5 мм после восстановления по ГОСТ 19575-84, %	≥50,0
Выход фракции -0.5 мм при испытаниях на истираемость по ГОСТ 15137-77, %	≤4,0
Выход фракции -0.5 мм после восстановления по ГОСТ 19575-84, %	≤5,0
Перепад давления газа в слое при восстановлении по ГОСТ 21707-76, Па (мм.вод.ст)	≤147 (15)

Таблица 4 – Показатели качества кокса, обеспечивающие вдувание в горн больших количеств ПУТ.

Показатели качества кокса	Требуемый уровень
Показатель прочности M_{25} , %	≥87,0
Показатель прочности M_{10} , %	≤6,0
Показатель прочности M_{40} , %	≥87,0
Показатель истираемости M_{10} , %	≤5,5
Содержание фракции +80 мм, %	≤5,0
Содержание фракции -40 мм, %	≤10,0
Влажность, %	≤0,5
Прочность после обработки CO ₂ (стандарт ISO) CSR, %	≥60,0
Реакционная способность по ГОСТ 10089-89, ед.	18-20
Реакционная способность по ISO CSI, %	23-28
Зольность, %	9-10

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Наиболее полно качество рудной части доменной шихты определяется в соответствии с ОСТ 14-9-96-83 «Система показателей качества продукции. Руды железные и марганцевые. Номенклатура показателей» (табл. 5).

Таблица 5 - Система показателей качества продукции. Руды железные и марганцевые.

Наименование показателя качества и единица измерения	Применяемость показателя качества		
	Вид продукции		
	руда	агломерат	окатыши
1. Химический состав			
1.1. Содержание железа, %	+	+	+
1.2. Допустимое отклонение по содержанию железа, %	+	+	+
1.3. Содержание двуокиси кремния, %	X	X	X
1.4. Содержание нерастворимого остатка, %	X	X	X
1.5. Основность	-	+	-
1.6. Допустимое отклонение по основности	-	+	+
1.7. Содержание фосфора, %.	X	X	X
1.8. Содержание серы, %.	X	X	X
1.9. Содержание окиси магния, %.	X	X	X
1.10. Содержание окиси кальция, %.	X	X	X
1.11. Содержание окиси алюминия, %.	X	X	X
1.12. Содержание закиси марганца, %.	X	X	X
1.13. Содержание пятиокиси ванадия,	X	X	X
1.14. Содержание меди, %.	X	X	X
1.15. Содержание цинка, %.	X	X	X
1.16. Содержание закиси железа, %	X	X	X
2. Гранулометрический состав			
2.1. Содержание контрольного класса крупности.	+	+	+
3. Показатели физических свойств			
3.1. Содержание влаги, %.	+	-	-
3.2. Допустимое отклонение по содержанию влаги, %.	-	-	-
3.3. Удельная поверхность, см ² / г.	-	-	-
3.4. Истинная плотность, г/ см ³	X	X	X
3.5. Объемная плотность, г/ см ³	X	X	X
3.6. Насыпная плотность, кг/ см ³	X	X	X
3.7. Газопроницаемость, Па	X	X	X
3.8. Усадка слоя при восстановлении, %	X	X	X
3.9. Температура начала размягчения, °С	X	X	X

4. Показатели физико-химических свойств			
4.1. Потери при прокаливании, %	X	X	X
4.2. Прочность при восстановлении, %	X	X	X
4.3. Восстановимость	X	X	X
4.4. Степень восстановления, %	X	X	X
4.5. Набухание при восстановлении, %	-	X	X
5. Показатели физико-механических свойств			
5.1. Прочность на сжатие, кг/окатыш	-	-	+
5.2 Показатель прочности, %	-	+	+

«+» обозначает обязательное применение показателя качества;

«-» обозначает, что показатель не применяется;

«X» обозначает, что показатель является справочным.

Как видно из таблицы, как в советских ГОСТах, так в дальнейшем и в украинских, обязательными параметрами являются только содержание железа и основность и допустимые отклонения по ним, прочность в исходном состоянии и гранулометрический состав. Характеристики же металлургических свойств редко используется, хотя, как показано отечественными и зарубежными исследователями, такие металлургические свойства железорудных материалов как низкотемпературная прочность, восстановимость, плавкость значительно влияют на производительность доменных печей и расход условного топлива. Так, например, рост на 10% низкотемпературной прочности повышает расход дутья на 1,7-2% и степень использования газа на 2%, а изменение восстановимости на 1% приводит к изменению расхода кокса на 0,3-0,8%.

Взаимосвязь высокотемпературных характеристик железорудного сырья с показателями доменной плавки изучена не достаточно, как правило, используются регрессионные уравнения (табл. 6).

Таблица 6 – Влияние металлургических свойств железорудных материалов на расход кокса.

Вид испытаний	Показатели	Влияние изменения параметра на расход кокса
Химический состав	Fe	1% → 0,9-1,5%К
	CaO/SiO ₂	0,1ед. → 0,5-1% К
ГОСТ 15137-77	Выход фракции -5мм	1% → 0,05 К
	Выход фракции -0,5мм	1% → 0,2 К
ГОСТ 19575-84	Истираемость X 0-0,5мм	1% → 0,2% К
Восстановимость	Степень восстановления R _к	1% → 0,3-0,5% К
Высокотемпературные испытания	T нач. фильтрации	50°C → 1%К
	Содержание FeO в первичном шлаке	10% → 0,5%К

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Методики определения параметров качества железорудного сырья и параметры испытаний регламентируются международными и отечественными стандартами (табл. 7 и рис. 1).

Таблица 7 – Стандартные методики определения металлургических свойств железорудного сырья.

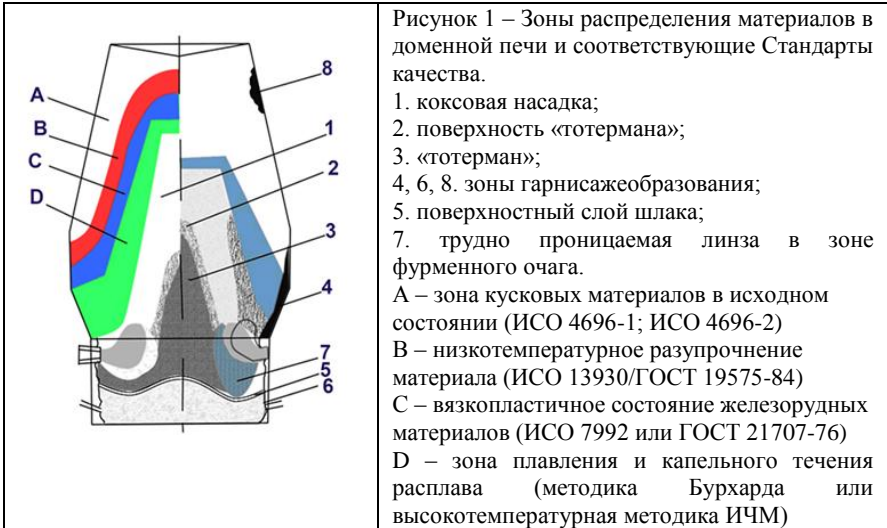
Характеристика	Международный стандарт	Аналогичный украинский стандарт
Холодная прочность, истираемость	ИСО 3271 Вращение в цилиндрическом барабане диаметром 1000 мм длиной 500 мм. Количество оборотов 200. Масса пробы 15 кг фракция 10-40 мм. Прочность: выход фр. + 6,3 мм Истираемость: выход фр. - 0,5мм	ГОСТ 15137-77 То же + 5 мм (+6,3) - 0,5 мм
Прочность окатышей при сжатии	ИСО 4700 Диаметр испытуемых окатышей, мм 10-12,5	ГОСТ 24765-81 10-15 (12,5)
Восстановимость	ИСО 4695 Восстановительный газ - CO, N ₂ Температура восстановления - 950°C	ГОСТ 28657-90 Проба массой 500 г, Крупность 10-12,5 мм. Состав вост. Газа CO (33±0,5), N ₂ - (65±0,5); Расход газа 30 дм ³ /мин. Скорость нагрева: До 600°C -15°C/мин. От 600 до 1100 - 2,86°C/м.
Относительная восстановимость	ИСО 7215 Восстановительный газ - CO, N ₂ Температура восстановления - 900°C. Проба фракции 10-12,5 мм	ГОСТ 28658-90 То же Проба фракции 1-3 мм
Прочность после восстановления	ИСО 4696-1 ИСО 4669-2 Изотермическое восстановление в неподвижном слое в течение 30 мин. при 550°C . Расход восстановительного газа (15±1) дм ³ /мин. Состав, %: CO (30±0,5); N ₂ - (70±0,5), Показатель RDI - выход фракции -2,8 мм после 900 оборотов барабана со скоростью 30 об/мин масса пробы 500 г, крупность: агломерата и руды -16-20 мм; окатышей - 10 - 12,5 мм	Отсутствует
Набухание окатышей	ИСО 4698	ГОСТ 26135-84

Восстановление под нагрузкой	ИСО 7992 Изотермическое восстановление при 1050° под нагрузкой (50±2) кПа при расходе газа 83 дм ³ /мин. Состав, %: -СО (40±0,5), N ₂ -(58±0,5), Н ₂ -(2,0±0,5) Продолжительность -до достижения потери кислорода 80%, Масса пробы 1200 г, фракция 10-12,5 мм. Показатели: перепад давления в слое, его усадка.	ГОСТ 21707-76 Давление на пробу 100 кПа. Нагрев до 600°С со скоростью 15°/мин., от600 до 1050°С- 2,81°С/мин. Расход восстановительного газа 50 дм ³ /мин. Состав, % : СО (33±0,5), N ₂ - (65±0,5); Показатели: перепад давления в слое, его усадка, степень восстановления.
Растрескивание руды	ИСО 8381 Метод оценивает эффект воздействия быстрого нагрева от комнатной температуры до 700° С за 30 мин на отобранную по размеру навеску 20-25 мм. Показатель: выход фракции менее 6,3 мм.	Отсутствует
Прочность при восстановлении	ИСО 13930 Восстановление при постоянной температуре 500°С в течение 60 минут. Расход восстановительн. газа (20±1) дм ³ /мин, состав СО (20±0,5); СО ₂ (20±0,5); N ₂ -(58±0,5), Н ₂ -(2,0±0,5) Масса пробы 500 г Крупность 10-12,5 мм Показатели: Коэффициенты прочности – фр. + 6,3 мм, измельчения – фр. -3,15 мм, истираемости - фр. - 0,5 мм	ГОСТ 19575-84 Масса, крупность пробы, состав газа как при определении восстановимости. Расход восстановительного газа -дм ³ /мин. Скорость нагрева: до 600°С 15°С/ мин. От 600 до 800°С- 1,43°С/мин. Показатели: прочность- фр. +10, разрушаемость -фр. 0,5-5 мм, истираемость - фр. 0 - 0,5 мм

На зарубежных предприятиях качество шихтовых материалов испытывается соответствующим стандартам ИСО с определенной периодичностью:

- химический состав - каждые 2 часа;
- холодная прочность - 4 часа;
- пористость - 4 часа;
- ситовая характеристика - 8 часов;

- восстановимость - 8 часов;
- восстановление под нагрузкой - 24 часа;
- размягчение под нагрузкой - 24 часа;
- разбухание окатышей - 24 часа.



На украинских предприятиях требования большинства ГОСТов редко используются в полной мере. Практика показывает, что при наличии на металлургическом предприятии собственной аглофабрики либо при постоянном поставщике сырья часто ограничиваются минимальными сведениями о его качестве и лишь в особых случаях проводят проверочные испытания. Как правило, оценка качества ЖРС ограничивается определением его химсостава и прочности по ГОСТу 15137-77 (ИСО 3271), хотя зачастую этих параметров не достаточно.

Для сопоставительного анализа различных видов железорудного сырья и оценки их влияния на производительность доменных печей и удельный расход топлива в ИЧМ в соответствии с перечисленными ГОСТами разработаны требования к металлургическим свойствам агломерата и окатышей (табл.8).

Изложение основных материалов исследования. В настоящее время в шихте доменных печей используется одновременно несколько видов сырья (агломерат, окатыши, руда, железосодержащие и флюсующие добавки, различные виды вторичных и пр.), физико-химические свойства которых существенно различаются.

Таблица 8 – Требования к качеству железорудного сырья.

Вид испытаний	Показатели качества	Величины показателей	
		агломерат	окатыши
ГОСТ 24765-81	Содержание в отгружаемой продукции (%) материала, с сопротивлением сжатию кг/образец (КН)	– –	Не менее 90 220 (3,0)
ГОСТ 15137-77	Прочность на удар (выход класса +5 мм), в стандартном барабане, %	Не менее 80	Не менее 95
	Истираемость (выход фр. 0,5 – 0 мм), %	Не более 4	Не более 3
	Крупность (мм) отгружаемой продукции, %	8-35 не менее 85	8-12 (8-16) не менее 95
	Содержание мелочи (выход фр. 5,0 – 0-мм) в отгружаемой, продукции, %	Не более 10	Не более 3
ГОСТ 21707-76	Прочность, выход фракции +5 мм после восстановления, (X_{+10})	Не менее 50	Не менее 80 (70)
	Истираемость, выход класса $X_{-(0,5-0\text{ мм})}$, при восстановлении, %	Не более 5	Не более 5
	Перепад давления газового потока при восстановлении слоя под нагрузкой, % мм вод. ст. (Па).	Не более 15 (147)	Не более 20 (196)
Допустимые колебания химического состава	содержания железа, %	Не более ±0,25	Не более ±0,25
	закиси железа, %	±1,0	–
	основности (CaO/SiO_2)	±0,025	±0,025
Допустимое содержание щелочей, %		Не более 0,15	Не более 0,15
Высокотемпературные испытания	Температура потери газопроницаемости слоя, °С	1260-1280	1230-1250
	Температура начала фильтрации жидких фаз, °С	Не менее 1380	Не менее 1350/1380*
	Температура максимальной, фильтрации расплава, °С	1500-1540	1500
	Содержание FeO в первичном шлаке, %	Не более 12	Не более 30/60
	Масса остатка расплава в слое кокса при температуре 1600°С, %	Не более 18	Не более 8

* для нефлюсованных окатышей с содержанием SiO_2 менее 5%.

Для моделирования их поведения в процессе от загрузки в доменную печь до образования металла и шлака в ИЧМ разработана и используется на практике методика, включающая последовательные испытания металлургических свойств материалов различного химического состава и способа окускования в диапазоне температур 20-1600°С, в том числе,

оценку холодной и горячей прочности, относительной восстановимости, а также оценку поведения материала в зоне размягчения, плавления и капельного течения [9].

Методика использует расчетные и экспериментальные методы и включает несколько этапов:

- лабораторные спекания аглошихты;
- контроль металлургических свойств;
- расчет комплексного показателя качества (Пк) по методике определения металлургической ценности железорудного сырья [10];
- проплавку лабораторных агломератов на коксовой насадке различной степени замусоренности;
- определение высокотемпературных свойств;
- анализ поведения различных смесей ЖРС при восстановительно-тепловой обработке.

Результаты экспериментов позволяют разрабатывать рекомендации по эффективному использованию различных видов ЖРС в доменной плавке на основе комплексного анализа их металлургических свойств и поведения в высокотемпературной зоне. На основе проведенных в ИЧМ исследований была опробована и внедрена в условиях одного из украинских предприятий технология подготовки части металлургических отходов к аглодоменному переделу, позволившая при сохранении качества чугуна уменьшить расход минерального сырья за счет увеличения расхода вторичных ресурсов. Содержание вторичных ресурсов в агломерационной и доменной шихте, используемой на предприятии, составляло 22-25 % от массы всех железосодержащих и флюсовых материалов. Ситуация осложнялось тем, что доля частично офлюсованных окатышей в составе шихтовых материалов периодически изменялась от 20 до 55 %, вызывая необходимость изменения химического состава агломерата в достаточно широком диапазоне. Что, в свою очередь, приводило к необходимости изменений программ распределения шихтовых материалов по сечению колошника так, чтобы обеспечивалась сохранность футеровки доменных печей.

Для выработки рекомендаций по предотвращению негативных явлений, связанных с резкими изменениями состава и свойств сырья, в лабораторных условиях ИЧМ были проведены исследования, включающие спекания аглошихты переменной основности с различными вторичными ресурсами, часть из которых были дополнительно гранулирована. Удельные расходы компонентов аглошихты задавали так, чтобы суммарный расход концентрата, руды, конвертерного шлака, известняка и вторичных ресурсов на 1 т агломерата оставался постоянным. Часть вторичных ресурсов (доменный отсев окатышей в смеси со шламами) брикетировалась в виде гранул. Расход

гранулированных отходов увеличивали за счет сокращения количества шлама. Состав аглошихты приведен в табл. 9, результаты спеканий в табл. 10, состав агломерата и его свойства в табл. 11 и 12.

Таблица 9 – Химический состав компонентов аглошихты.

Материал	Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Mn	MgO	Al ₂ O ₃	P	C	S	Zn
Гран.отходы промышл.	51,60	20,70	8,00	7,60	0,32	1,77	0,73	0,02	0,08	0,02	0,00
Гран. отходы лаборат. углеродсод.	40,30	18,00	8,60	7,20	0,32	1,75	0,73	0,02	28,40	0,00	0,00
Аглоруда	60,09	4,28	5,11	0,16	0,00	0,39	2,18	0,05	0,38	0,03	0,00
Концентрат ИнГОК	67,00	30,14	6,11	0,15	0,02	0,48	1,48	0,03	0,18	0,03	0,00
Конвертерный шлак	15,07	15,60	20,45	52,29	2,36	8,51	2,38	0,23	0,00	0,43	0,00
Шлам	49,00	13,21	5,81	8,50	0,32	1,77	1,84	0,04	7,05	0,57	0,18
Окалина	70,98	55,40	0,62	0,88	0,42	0,81	1,19	0,03	0,44	0,04	0,05
Аспирационная пыль	55,81	8,85	6,52	6,94	0,06	1,06	1,63	0,05	3,56	0,27	0,00
Колошниковая пыль	37,22	8,94	7,73	10,85	0,14	1,71	1,95	0,03	14,42	0,67	0,31
Отходы с прессножиц	57,62	9,23	7,48	6,79	2,56	4,60	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00
Мет. фракция 0- 10 мм	48,00	10,41	11,17	26,30	2,56	4,60	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00
Промсырье	38,10	8,87	8,20	10,19	0,00	1,65	1,90	0,03	8,56	0,27	0,00
Окалина ММЗ	72,54	55,08	0,69	0,68	0,49	0,52	1,08	0,03	0,52	0,05	0,05
Известняк Комсомольс.РУ	0,10	0,00	3,84	51,55	0,60	1,61	0,34	0,00	11,84	0,06	0,00
Известь	0,20	0,00	2,06	66,00	0,00	10,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 10 – Результаты спеканий.

Показатели	Гранулы				
	промыш- ленные	лабораторные углеродсодержащие			
Расход коксовой мелочи, кг/т	43	43	37	31	25
Насыпная масса шихты, т/м ³	1,85	1,83	1,80	1,81	1,8
Выход годного, %	74,5	65,55	76,78	73,85	60,34
Вертикальная скорость спекания, мм/мин.	23,29	20,08	23,13	20,89	21,81
Удельная производительность, т/м ² час	1,74	1,35	1,80	1,55	1,33
Испытания на барабане + 5 мм, %	65,6	69,7	69,2	65,08	66,0

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Таблица 11 – Химический состав и металлургические свойства агломерата при использовании в шихте различных гранул

	Расход коксовой мелочи	Fe	CaO/SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO
Пром. гран.	43	55,37	1,67	2,00	1,85	10,70
Лабор.гран.	43	54,72	1,66	1,98	1,86	16,50
Лабор.гран.	37	54,85	1,67	1,98	1,84	13,90
Лабор.гран.	31	54,85	1,68	2,00	1,81	12,10
Лабор.гран.	25	54,83	1,68	1,98	1,79	8,70

Таблица 12 – Химический состав и металлургические свойства агломерата при использовании в шихте различных гранул

	Расход кокс. мелочи	Б+5	Б-0,5	Б+6,3	Б-0,5	T _{нф}	M _{ост}	FeO _{пш}
Пром. гран.	43	65,60	5,30	34,59	5,78	1370	13,44	10,13
Лабор. гран.	43	69,70	5,30	-	-	-	-	-
Лабор. гран.	37	69,20	5,10	36,80	5,60	1380	12,50	7,90
Лабор. гран.	31	65,08	7,20	-	-	-	-	-
Лабор. гран.	25	66,00	7,80	-	-	-	-	-

Анализ результатов исследования свойств промышленных и лабораторных агломератов показал, что использование в составе агломерационной шихты части гранулированных отходов (60-85 кг на тонну агломерата) в сравнении с агломератом, спеченным с неподготовленными отходами, привело к:

- повышению прочности агломерата в исходном состоянии на 3,5-4%;
- сохранению его истираемости на удовлетворительном уровне (6,3% и 6,2% соответственно);
- повышению низкотемпературной прочности (по выходу фракции +6,3%) на 2,5-3,5%;
- улучшению восстановимости на 0,5-1,0%.

Значения температур размягчения, плавления и капельного течения расплава практически не изменились (находились в пределах статистического отклонения), а содержание FeO в первичных шлаковых расплавах, полученных при проплавке лабораторных агломератов, уменьшилось на 1,5-3%.

Вывод. Анализ технико-экономических показателей работы агломерационного цеха с использованием гранулированных отходов подтвердил эффективность гранулирования, при этом:

- вертикальная скорость спекания аглошихты при вводе отсева окатышей в количестве до 85 кг/т агломерата осталась на базовом уровне;
- прочность агломерата при содержании отсева окатышей более 85 кг/т и недоокомковании шихты резко упала;
- замена отсева окатышей гранулами из отсева окатышей и шлама привела к увеличению скорости спекания на 7,6 % (с 21,63 до 23,26 мм/мин), прочность агломерата при этом увеличилась на 3,8 %;
- выход агломерата второго сорта сократился на 2,3 %, основность агломерата в среднем повысилась с 1,5 до 1,85 ед.;
- прочность агломерата ($B > 5$) повысилась на 2,4 %;
- соотношение концентрат/аглоруда уменьшилось с 1,36 до 1,24;
- количество вторичных ресурсов увеличилось на 26,4 кг/т агломерата;
- постоянство состава агломерата по основности улучшилось на 7,5%.

Разработаны требования к качеству гранулированных отходов и их рациональному количеству в составе агломерационной шихты, а также отработан процесс производства гранул, которые позволили увеличить количество вторичных ресурсов в составе аглошихты, стабилизировать химический состав агломерата, улучшить его прочность и сократить выход агломерата второго сорта.

Повышение качества агломерата и рациональное распределение шихтовых материалов по сечению колошника, обеспечивающие самообновление защитного гарнисажа, позволили сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна и уменьшить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна, что привело к улучшению конкурентоспособности продукции даже при дополнительных затратах на подготовку аглошихты к спеканию.

Перелік посилань

1. *Peters M., Korthas B., Schmole P.* The past, present and future of pulverized coal injection at ThyssenKrupp Steel AG Proc. 36th Mc-Master University Symp. on Iron and Steelmaking, Hamilton, Ontario, Canada, 23 - 25 September 2008, p. 14-29.
2. *Третьяк А.А.* Рекомендации VIII Международного конгресса «Металлургия чугуна – вызовы XXI века// *Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков.* – М.: Изд.дом «Кодекс». – 2017. – С. 609-612.
3. *Материалы 26-й Конференции Доменщиков Украины (11-12 октября 2017 г., ЧАО "ММК им. Ильича)/ [Электронный ресурс].* – Режим доступа: <https://fex.net>
4. *Волков Ю.П., Шнарбер Л.Я., Гусаров А.К.* Технолог-доменщик. М.: *Металлургия.* – 1986. – 263 с.
5. *Зражевский А.Д.* Доменное производство Украины // *Труды VIII Международного конгресса доменщиков “Металлургия чугуна – вызовы XXI века”.* – М.: Кодекс. – 2017. – С. 35-37.

6. *Процессы при вдувании угольных пылей в доменную печь*/ Летцель Д., Хунгер Й., Крюгер В. и др. // *Черные металлы*. – 1999. – №5. – С.20-28.
7. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании / *Металлы*. – 1987 №3 С.9-11.
8. *Золотухин Ю. А.* Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива / *Золотухин Ю. А., Андрейчиков Н. С., Куколев Я. Б.* // *Кокс и химия*. – 2009. – № 3. – С. 25-31.
9. *ГОСТ 15137-87.* Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 6 с.
10. *Исследование* высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях. Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Лопатенко К.П. и др. // *Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. – Днепропетровск. – 2018. – Вып.32. – С.64-79.
11. *Патент* РФ №2283877 Способ определения металлургической ценности доменного железорудного сырья / *Гуркин М.А., Гельгорн А.В., Нестеров А.С., Большаков В.И., Невраев В.П., Денисова С.Ю., Якушев В.С.*

Reference

1. *Peters M., Korthas B., Schmole P.* The past, present and future of pulverized coal injection at ThyssenKrupp Steei AG Proc. *36th Mc-Master University Symp. on Iron and Steelmaking, Hamilton, Ontario, Canada, 23 - 25 September 2008*, p. 14-29.
2. *Tretyak A.A.* (2017). Rekomendatsii VIII Mezhdunarodnogo kongressa Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka [Recommendations of the VIII International Congress Iron Metallurgy - Challenges of the 21st Century]. *Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka. Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov [Iron metallurgy - challenges of the XXI century. Proceedings of the VIII International Blast Furnace Congress]*, Moskva: Izd.dom Kodeks, 2017, 609-612 (in Russian).
3. *Materialy 26-y Konferentsii Domenshchikov Ukrainy [Materials of the 26th Conference of Ukraine blast furnace]* (11-12 oktyabrya 2017 g), CHAO MMK im. P'icha, Available at: <https://fex.net>
4. *Volkov YU.P., Shparber L.YA., & Gusarov A.K.* (1986). *Tekhnolog-domenshchik [Blast furnace technologist]*. Moskva: Metallurgiya, 1986, 263 (in Russian).
5. *Zrazhevskiy A.D.* (2017) *Domennoye proizvodstvo Ukrainy [Blast furnace production in Ukraine]*. *Trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka [Proceedings of the VIII International Congress of Blast Furnaces Iron metallurgy - challenges of the XXI century]*, Moskva: Kodeks, 2017, 35-37 (in Russian).
6. *Lettsel D., Khunger V.* et al. (1999). *Protsessy pri vduvanii ugol'nykh pyley v domennuyu pech [Processes for blowing coal fields into a blast furnace]*. *Chernyye metally [Ferrous metals]*, 1999, 5, 20-28 (in Russian).
7. *Gladkov N.A. & Nesterov A.S.* (1987). *Protsessy v sloye zhelezorudnykh materialov pri yego nagrevanii [Processes in a layer of iron ore materials during heating]*. *Metally [Metals]*, 1987, 3, 9-11 (in Russian).

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - *Вып.33*
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – *Collection 33*

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2019. – *Vypusk 33*

8. Zolotukhin YU.A., Andreychikov N. S. & Kukolev YA.B. (2009). Trebovaniya k kachestvu koksa dlya domennykh pechey, rabotayushchikh s razlichnym udel'nyim raskhadom pyleugol'nogo topliva [Requirements for the quality of coke for blast furnaces operating with different specific consumption of pulverized coal]. *Koks i khimiya [Coke and chemistry]*, 2009, 3, 25-31 (in Russian).
9. Rudy zheleznyye i margantsevyeye, aglomeraty i okatyshi. Metod opredeleniya prochnosti vo vrashchayushchemsya barabane [Iron and manganese ores, agglomerates and pellets. Method for determining strength in a rotating drum], (1987), GOST 15137-87, 6 p.
10. Issledovaniye Nesterov A.S., Garmash L.I. & Lopatenko K.P. et al. (2018). Issledovaniye vysokotemperaturnyyekh svoystv zhelezorudnykh materialov v laboratornykh usloviyakh [Investigation of high-temperature echo properties of iron ore materials in laboratory conditions]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii Sb. nauchn. tr. ICHM [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific articles ISI NANU]*. Dnepropetrovsk, 2018, 32, 64-79 (in Russian).
11. Gurkin M.A., Gelgorn A.V., Nesterov A.S., Bolshakov V.I., Nevraev V.P., & Denisova S.Yu. et al. RF Patent №2283877. Sposob opredeleniya metallurgicheskoy tsnnosti domennogo zhelezorudnogo syr'ya [Method for determining the metallurgical value of blast furnace iron ore raw materials]. (in Russian).

О.С.Нестеров, к.т.н., с.н.с., зав.відділом; ORCID 0000-0002-0183-0327

Л.І.Гармаш, к.т.н., с.н.с; ORCID 0000-0002-9540-3037

Институт черной металлургии им.З.И.Некрасова НАН Украины

Підвищення ефективності доменної плавки за рахунок поліпшення якості залізорудних матеріалів

Анотація Проведено аналіз якості залізорудної сировини, що застосовується в аглодоменому виробництві України і зарубіжних країн. Наведено вимоги міжнародних і вітчизняних стандартів до якості сировини і палива, що забезпечують вдунання в горн великих кількостей ПВП. Описано розроблену в ІЧМ методику визначення якості сировини. Наведено результати дослідження якості залізорудної сировини за розробленою методикою. На підставі аналізу результатів проведених досліджень було розроблено вимоги до якості гранульованих залізорудних відходів та їх раціонального кількості у складі агломераційної шихти, а також відпрацьовано процес виробництва гранул. Розроблено рекомендації щодо використання в агломераційній шихті частини гранульованих компонентів вторинних відходів, що дозволило підвищити вміст вторинних ресурсів у шихті. В результаті стабілізовано хімічний склад агломерату, поліпшено його міцність, скорочено вихід агломерату другого сорту, зменшено винос колошникового пилу і витрати коксу. Підвищення якості агломерату та раціональний розподіл шихтових матеріалів по перетину колошника доменної печі дозволяє забезпечити самовідновлення захисного гарнісажу, скоротити винос колошникового пилу на 4,3 кг / т чавуну, зменшити витрати коксу на 19,6 кг/т чавуну. Розроблені заходи дозволяють підвищити конкурентоспроможність продукції, навіть при додаткових витратах на підготовку агломераційної шихти до спікання.

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2019. - Вып.33

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2019. – Collection 33

ISSN 2522-9117 «Fundamental'nye i prikladnyye problemy černoj metallurgii». – 2019. – Vypusk 33

Ключові слова: доменна піч, якість залізорудної сировини, методика дослідження, агломерат, вторинне залізорудну сировину, гранулювання, спікання

A.S.Nesterov, PhD, Senior Researcher, Head of Department; <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

L.I.Garmash, PhD, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9540-3037>

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Increasing the efficiency of blast-furnace smelting by improving the quality of iron ore materials

Summery. It is noted in the work that when mastering the technology of pulverized coal injection (PUT) at the metallurgical enterprises of Ukraine, it is necessary to intensify work, including research, in the direction of improving the quality characteristics of the sinter, the stability of its chemical composition and strength parameters. The analysis of the quality of iron ore raw materials used in sintering production in Ukraine and foreign countries is carried out. The requirements of international and domestic standards for the quality of raw materials and fuels, providing for the injection of large quantities of firearms into the furnace, are given. A methodology for determining the quality of raw materials developed in the HMI is described. The results of a study of the quality of iron ore raw materials according to the developed method are presented. Based on the analysis of the results of the research, requirements were developed for the quality of granular iron ore wastes and their rational amount in the composition of the sinter charge, and the process for the production of granules was developed. Recommendations have been developed on the use in the sinter mixture of a part of the granular components of secondary waste, which allowed to increase the content of secondary resources in the mixture. As a result, the chemical composition of the sinter was stabilized, its strength was improved, the yield of sinter of the second grade was reduced, the removal of blast furnace dust and coke consumption were reduced. Improving the quality of the sinter and the rational distribution of charge materials over the cross-section of the top of the blast furnace allows for self-renewal of the protective skull, to reduce the removal of top dust by 4.3 kg / t of cast iron, and to reduce coke consumption by 19.6 kg / t of cast iron. The developed measures make it possible to increase the competitiveness of products, even at the additional cost of preparing the sinter mixture for sintering.

Keywords: blast furnace, quality of iron ore raw materials, research methodology, agglomerate, secondary iron ore raw materials, granulation, sintering

For citation: *Nesterov A.S., Garmash L.I. Povysheniye effektivnosti domennoy plavki za schet uluchsheniya kachestva zhelezorudnykh materialovmetallurgii. [Improving the efficiency of blast furnace smelting by improving the quality of iron ore materials.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 43-60. (In Russian). DOI 10.52150/2522-9117-2019-33-43-60*

Статья поступила в редакцию сборника 17.11.2019 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №2 от 23 декабря 2019 года)