

УДК 622.785.017:669.1

**А.С.Нестеров, В.С.Якушев, А.Д.Джигота, Л.И.Гармаш, М.Г.Болденко,
Ю.М.Лихачев**

ПОЛУЧЕНИЕ АГЛОМЕРАТА ЗАДАННОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ ПРИ ВОВЛЕЧЕНИИ В ШИХТУ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Целью работы является исследование взаимовлияния производства агломерата и чугуна по технологическим и шихтовым условиям, в том числе с привлечением методов математического моделирования, при котором возможна прогнозная оценка показателей плавки доменных шихт с использованием агломерата различной основности. Оценено влияние температурно–теплого уровня спекания и офлюсования многокомпонентных агломерационных шихт на качество окускованного продукта.

агломерат, шихта, математическое моделирование, основность, окускованный продукт.

Современное состояние вопроса. Агломерационный процесс, являющийся, по сути, производителем полупродукта, остается базовым с точки зрения достижения соответствующих результатов производства чугуна, решения важных ресурсосберегающих и экологических проблем горно–металлургического комплекса.

Технологическим фактором управления результатами спекания, не требующим дополнительных текущих и капитальных затрат, является оптимизация температурно–теплого уровня процесса, реализуемая через подбор крупности топлива в соответствии со склонностью к жидкофазному спеканию минеральных и техногенных составляющих аглошихты.

В исследованиях, проведенных ранее [1], данный фактор рассматривался для аглошихт, характерных для предприятий Кривбасса, в данной работе – для аглошихт, характерных для некоторых аглошихт Донецкого региона. Если управление температурно–тепловым уровнем спекания является сугубо тактическим приемом на стадии производства агломерата, то влияние офлюсования продукта носит стратегическую направленность в цепи «аглопроцесс – доменная плавка» [2–4].

Вопросы офлюсования агломерата, являясь, на первый взгляд, вопросами подготовки и ввода флюса в аглошихту, предопределяют, в конечном счете, рационализацию его распределения между обеими процессами.

Методика исследований. Методика подготовки шихты к спеканию и оценки результатов аглопроцесса изложена в работе [1]. Применительно к прогнозу результатов доменной плавки она расширена за счет моделирования поведения агломерата в исходном состоянии и при восстановительной–тепловой обработке, с использованием:

- показателей прочности и истираемости агломерата в исходном состоянии по выходу фракции +5 мм и 0–5 мм соответственно;

- показателей прочности (RDJ+6,3) и истираемости (RDJ –0,5) агломерата при восстановлении по стандарту ИСО [5];
- методики ИЧМ [6] по определению в процессе плавления массы образующегося первичного шлака (Мпш), содержания в нем закиси железа (FeОпш), температуры потери газопроницаемости слоя (Тпг), начала фильтрации из него расплава (Тнф), остатка непрофильтованного через коксовую насадку материала (Мост);
- обобщенного показателя качества агломерата (Пк), комплексно отражающий влияние его свойств на расход кокса в доменной плавке [7] (методика ИЧМ и ОАО «Северсталь»).

Параметры Тпг и Тнф характеризуют положение верхней и нижней границы зоны когезии в доменной печи. Состав шихтовых материалов, используемых в экспериментах, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав компонентов аглошихты

Материал	Содержание, %									
	Fe _{общ}	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	C	п.п.п	S
Аглоруда	56,47	15,45	0,19	0,47	1,58	0,05	0,10	0,27	0,91	0,017
Концентрат	67,11	5,68	0,13	0,32	1,55	0,02	0,05	0,28	–	0,057
Отсев агломерата	53,42	8,58	10,25	1,48	1,53	0,15	0,07	2,28	2,97	0,098
Колошниковая пыль	41,66	7,88	10,80	1,82	2,09	0,19	0,05	10,87	17,50	0,52
Конвертерный шлак	22,92	18,10	41,79	5,69	2,30	2,83	0,64	–	–	0,37
Коксовая мелочь	1,97	7,31	0,11	0,13	5,45	н.д.	н.д.	79,4	2,0	1,28
Известняк	0,39	2,10	51,47	3,16	0,38	н.д.	н.д.	0,05	42,9	0,06
Известь	0,2	1,60	64,55	10,96	–	–	–	–	20,79	–
Окалина	72,68	0,93	0,96	0,67	0,81	0,76	0,034	–	0,40	0,05
Шлам	50,22	5,68	9,12	1,90	1,88	0,47	0,070	–	9,70	0,37

Компоненты дозированы сухими с последующим смешиванием, увлажнением до 7,8–8,2% и окомкованием в чашевом грануляторе. Подготовленную шихту загружали в аглочашу, закигали в течение 1,5 мин. газовой горелкой и спекали при разрежении 800 мм водяного столба.

Влияние крупности коксовой мелочи на результаты спекания.

В спеканиях использовали коксовую мелочь фракций 0–0,5 мм (X1), 0,5–3 мм (X2), 3–5 мм (X3) и их смеси (X12, X13, X23, X123), что позволило построить математические модели «состав – свойство» по симплекс–решетчатому методу планирования эксперимента [8]. Результаты в графическом виде, полученные по разработанной в ИЧМ программе, представлены на рис. 1.

В этой серии опытов влажные шлам и окалина не использовались, что в производственных условиях имеет место обычно в зимний период. Спекания проводились в малой аглочаше с внутренним диаметром 124 мм.

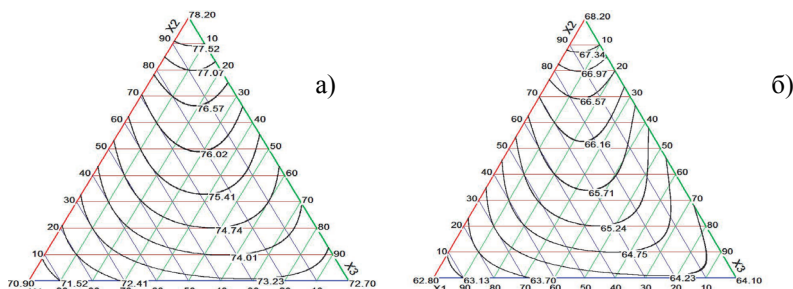


Рис. 1. Влияние гранулометрического состава коксовой мелочи на выход годного (а) и прочность агломерата (б).

Состав шихты приведен в табл.2. Результаты спеканий представлены в табл.3.

Таблица 2. Компонентный состав аглошихты.

№ п/п	Материал	Содержание	
		%	кг/т агломерата
1	Аглоруда	23,94	297
2	Концентрат	44,26	549
3	Отсев агломерата	8,14	101
4	Колошниковая пыль	3,31	41
5	Конвертерный шлак	0,97	12
6	Известняк	14,08	174,7
7	Коксовая мелочь	5,30	65,8

Из анализа полученных результатов видно, что наиболее неблагоприятной фракцией в топливе является его пылеватая составляющая 0–0,5 мм, не обеспечивающая в полной мере при сгорании необходимый температурно–тепловой режим спекания тугоплавких составляющих шихты, потерявших в определенной мере способность к повторному минералообразованию из–за предшествующей тепловой обработки. Наилучшие результаты достигаются на калиброванном топливе фракции 0,5–3 мм, выделить которую практически невозможно, но технологически достижимо сочетать ее с другими фракциями в процессе дробления топлива.

С точки зрения повышения качества агломерата отмечается целесообразность «загрубления» помола топлива с фракции 0–3 мм до фракции 0–5 мм, что повышает температурно–тепловой уровень спекания шихт с содержанием тугоплавкого вторичного сырья и улучшает прочностные свойства спека. Это достигается частичным замещением (на 15–20%) топлива фракции 0–0,5 мм фракцией 3–5 мм. Кроме того, это сопровождается снижением износа валков четырехвалковых дробилок топлива за счет увеличения зазора между валками.

Таблица 3. Влияние крупности коксовой мелочи на показатели агломерации и качество агломерата.

№, п/п	Доля фракции топлива (мм), ед. Показатель агломерирования	-0,5	0,5-3	3-5	1/2-0,5	1/2-0,5	1/2	1/3-0,5
		(X1)	(X2)	(X3)	1/2 1/2 0,5-3	1/2 3-5	1/2 3-5	1/3 0,5-3 1/3 3-5 (X123)
1	Насыпная масса шихты, т/м ³	1,80	1,80	1,80	1,81	1,80	1,79	1,81
2	Вертикальная скорость спекания, мм/мин.	17,60	18,75	16,90	18,33	17,65	18,18	17,65
3	Усадка пирога, мм	52	50	48	51	51	49	50
4	Выход годного, %	70,9	78,2	72,7	74,5	73,0	75,1	75,4
5	Удельная производительность, т/м ² час	1,14	1,33	1,13	1,24	1,18	1,24	1,25
6	Прочность (+5мм), %	62,8	68,2	64,1	65,0	64,0	64,9	65,7
7	Истираемость (-0,5мм), %	6,1	5,9	6,2	6,0	6,2	6,2	6,0
8	FeO в годном, %	13,7	14,6	14,3	14,0	14,1	14,3	14,3
9	Максимальная температура, °С: - в середине слоя - отходящего газа	1325 275	1400 380	1375 310	1375 330	1370 320	1380 345	1380 350

Влияние основности на результаты спекания агломерата.

Спекания аглошихт проводили в лабораторных условиях в аглочаше диаметром 220 мм. Методики подготовки и спекания такие же, как и при определении влияния крупности коксовой мелочи. Химический состав компонентов шихты приведен в табл.1. В шихту дополнительно вводили окалину и шлам, а при расчетах также учитывали известь.

Возврат собственный (агломерационный) вводили в шихту в количестве 20%. Возврат и отсев агломерата соответствующей основности получали в предварительных спеканиях с последующим раздробливанием спека в щековой и валковой дробилках до необходимой крупности 0-10 мм. Аглоруду, конвертерный шлак и слежавшийся шлак использовали крупностью 0-10 мм, топливо (коксовую мелочь) - 0-5 мм, известняк - 0-3 мм, концентрат, колошниковую пыль и окалину - естественной крупности. Соотношение концентрат : аглоруда в рудной смеси принималось 66,85 : 33,15, расход на тонну агломерата отсева (107,3 кг), колошниковой пыли (40,9 кг), конвертерного шлака (11,9 кг), окалины (11,0 кг), твердого топлива (63,6 кг), шлама (29,9 кг) выдерживались постоянными. Шихту

офлюсовывали рядовым известняком до соответствующей основности агломерата.

Прочностные свойства агломерата оценивали по методике ИЧМ по выходу годного фракции +10 мм на двух стадиях обработки спека перед испытанием прочности (П) и истираемости (И) по ГОСТ 15137–79:

- после сбрасывания горячего аглопирога (ВГС);
- после повторного отсева остывшего агломерата (ВГО).

Показатель ВГО отражал разрушение агломерата из-за полиморфного превращения двухкальциевого силиката при температуре ниже 580⁰С, что важно при оценке влияния основности. По выходу годного на обеих стадиях определялась удельная производительность аглоустановки (РС и РО соответственно). Характеристика шихты, результаты ее спекания и качество агломерата различной основности представлены в табл.4.

Таблица 4. Результаты лабораторных испытаний по получению агломерата различной основности

№	Показатель		Основность						
			1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
1	Расход сухих, кг/тн агломерата	Аглоруда	23,0	22,43	21,85	21,57	21,29	20,77	20,26
		Концентрат	46,37	45,23	44,07	43,49	42,49	41,88	40,85
		Известняк	12,56	15,79	18,93	20,47	21,99	25,0	27,95
		Всего шихты без возврата	108,4	109,1	111,3	112,0	112,7	114,1	115,5
2	Насыпная масса окомкованной шихты, т/м ³		1,90	1,85	1,83	1,82	1,82	1,79	1,78
3	Вертикальная скорость спекания, мм/мин		19,7	20,6	20,9	21,3	21,6	21,7	22,0
4	Масса аглопирога, кг		18,5	17,6	17,1	17,0	16,8	16,16	16,5
5	Выход годного после спекания (ВГС), %		64,4	63,4	61,5	61,1	61,1	65,1	68,9
6	Выход годного после охлаждения (ВГО), %		56,8	49,1	47,2	46,3	50,9	56,6	63,2
7	Прочность агломерата (П), %		77,3	75,3	74,5	73,1	72,7	79,0	80,7
8	Истираемость (И), %		5,7	5,8	6,1	6,3	6,3	6,0	5,6
9	Удельная производительность по годному агломерату, т/м ² час	РС	1,24	1,22	1,18	1,16	1,17	1,22	1,29
		РО	1,09	1,02	0,95	0,93	0,93	1,0	1,07
10	Фракционный состав (мм) агломерата после охлаждения, %	+40	18,9	13,6	6,4	–	–	–	–
		5–40	76,0	79,9	85,0	90,9	93,3	96,0	96,1
		0–5	5,1	6,5	8,6	9,1	6,7	4,0	3,9

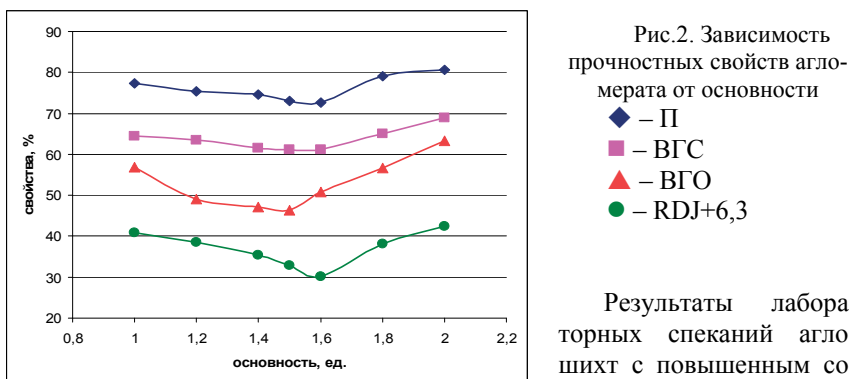
11	Максимальная температура в средней по высоте части спекаемого слоя, °С	1430	1400	1370	1350	1350	1310	1290	
12	Продолжительность существования температуры выше 1200 °С, мин	1,75	1,75	1,50	1,50	1,40	1,25	1,25	
13	Макс. температура отходящего газа, °С	460	450	420	420	410	400	400	
14	Усадка слоя после спекания, мм	45	46	48	48	50	50	50	
15	Химический состав агломерата, %	Fe	56,79	55,60	54,38	53,78	53,20	52,08	50,99
		FeO	15,50	14,60	13,00	12,10	11,40	10,50	9,70
		Fe ₂ O ₃	63,90	63,20	63,24	63,38	63,33	62,73	62,06
		SiO ₂	8,90	8,80	8,70	8,64	8,59	8,50	8,41
		CaO	8,90	10,56	12,18	12,97	13,75	15,30	16,81
		MgO	1,02	1,11	1,21	1,25	1,30	1,39	1,47
		Al ₂ O ₃	1,88	1,86	1,84	1,84	1,83	1,81	1,79
		MnO	0,102	0,101	0,101	0,100	0,100	0,100	0,099
	P ₂ O ₅	0,061	0,060	0,058	0,058	0,057	0,056	0,055	
16	Низкотемпературные свойства								
	RDI +6,3, %	40,8	38,6	35,4	32,8	30,2	38,2	42,4	
	RDI -0,5, %	13,6	14,2	15,1	15,5	15,5	14,8	13,4	
17	Высокотемпературные свойства								
	Мпш., %	30,30	24,70	19,50	17,00	14,50	8,30	4,20	
	FeO п.ш., %	21,06	17,93	15,17	13,95	12,55	9,62	6,78	
	T п.г. С	1215	1220	1230	1235	1245	1260	1275	
	T н.ф., С	1310	1345	1385	1405	1425	1460	1495	
	М ост., %	7,0	8,0	10,0	13,5	17,8	22,6	27,2	
18	Обобщенный показатель качества Пк, бал.	10,59	10,51	10,41	10,12	10,00	10,77	11,17	

При увеличении основности агломерата расход компонентов аглошхты, ее насыпная масса, вертикальная скорость спекания изменяются практически линейно, а его прочностные характеристики и гранулометрический состав, а также производительность аглоустановки – экстремально с явно выраженным минимумом в интервале основности 1,4–1,6 ед. (рис.2)

Разупрочнение агломерата в исходном состоянии, а также при восстановительно–тепловой обработке вызвано многофазностью соединений,

а также полиморфным превращением двухкальциевого силиката 2CaOSiO_2 с увеличением объема примерно на 10% и, как следствие, высоким уровнем внутренних напряжений.

С повышением расхода известняка снижается температурно-тепловой уровень спекания (максимальная температура в спекаемом слое и отходящего газа, содержание FeO в агломерате), что уменьшает газодинамическое сопротивление спекаемого слоя и положительно отражается на вертикальной скорости спекания. В то же время, необходимо отметить, что высокие показатели качества агломерата с увеличением основности могут проявиться только при обеспечении стандарта предприятия по колеблемости химического состава. Как видно из таблицы, отклонение химического состава от заданной величины в меньшей мере играет роль при низких основностях агломерата, чем при высоких. При высоких основностях отклонение от заданного уровня нарушает не только шлаковый режим, но и в значительной мере влияет на комплекс металлургических свойств как в исходном состоянии, так и при восстановительно-тепловой обработке.



Результаты лабораторных спеканий аглошихт с повышенным содержанием вторичного

сырья в диапазоне основности от 1,0 до 2,0 ед. и оценка металлургических свойств лабораторных агломератов показали, что:

- вертикальная скорость спекания агломерата с ростом основности увеличивается в среднем на 1,28% на каждые 0,1 ед. основности;
- удельная производительность по годному агломерату и выход годного после спекания имеют знакопеременные значения. В диапазоне основности 1,0–1,6 ед. удельная производительность и выход годного снижаются на 2,66% и 0,96% отн. соответственно, а в диапазоне основности 1,6–2,0 ед. повышаются на 3,76% и 3,28% отн. соответственно;
- исходная прочность агломерата и прочность после восстановления в диапазоне основности 1,4–1,6 ед. находится на минимальном уровне;

- высокотемпературные свойства агломерата с повышением основности улучшаются, содержание FeO в первичном шлаке снижается с 21,0% до 6,0%, температура начала фильтрации жидких фаз повышается с 1310⁰С до 1495⁰С;
- обобщенный показатель качества агломерата при росте основности от 1,2 ед. до 2,0 ед. повышается на 0,7 бала, что только за счет улучшения металлургических свойств агломерата позволяет ожидать сокращения расхода кокса на 2,94 кг/т чугуна.

1. *Особенности* агломерации шихт с повышенным содержанием вторичного сырья / А.С.Нестеров, В.С.Якушев, А.Д.Джигота и др.//Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.научн.трудов ИЧМ. Выпуск 17. – 2008. – С.52–57.
2. *Леонидов Н.К.* Подготовка сырьевых материалов черной металлургии – В кн.: Итоги науки и техники. Т. 14. Производство чугуна и стали. – М. ВИНТИ, 1983 – С.3–68.
3. *Шкодин К.К.* Роль физической структуры агломерата в восстановительных процессах. – В кн.: Форсирование доменной плавки. – М.: Металлургиздат, 1963. – С.92–106.
4. *Совершенствование* агломерационного процесса / Ф.Ф.Колесанов, Н.С.Хлапонин и др. – К.: Техніка, 1983. – 110с.
5. *Стандарт* ИСО 13930. Определение прочности при восстановлении.
6. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.,* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании // Изв. АН СССР. Металлы. – 1987. – № 3. – С.9–11.
7. *Пат. № 2283877 (РФ).* «Способ определения металлургической ценности доменного железорудного сырья. Оpubл. 20.09.2006. Бюл. № 25.
8. *Влияние* гранулометрического состава различных видов топлива на прочность агломерата/ Г.Г.Ефименко, А.Г.Покотилов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1976. № 7. – С.23–27.
9. *Вегман Е.Ф.* Теория и технология агломерации. – М.: Металлургия, 1974. – 286с.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук Н.М.Можаренко

О.С.Нестеров, В.С.Якушев, О.Д.Джигота, Л.І.Гармаш, М.Г.Болденко, Ю.М.Лихачев

Одержання агломерату заданого вмісту і властивостей при залученні у шихту вторинної сировини

Метою роботи є дослідження взаємовпливу виробництва агломерату та чавуну за технологічними і шихтовими умовами, зокрема з використанням методів математичного моделювання, при якому можлива прогнозна оцінка показників плавки доменних шихт з застосуванням агломерату різної основності. Оцінено вплив температурно-теплого рівня спікання та офлюсування багатокомпонентних агломераційних шихт на якість згрудкованого продукту.