DOI *10.18454/PMI.2016.5.675*

УДК 622.76:669.712.1

РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН И ПРОЧНОСТИ АГЛОМЕРАТОВ

В.Л.ТРУШКО, В.А.УТКОВ
Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Рассмотрена проблема саморазрушения промышленных офлюсованных агломератов при охлаждении после спекания. Выявлено, что основной причиной разупрочнения является полиморфизм двухкальциевого силиката Ca_2SiO_4 (C_2S): β-$Ca_2SiO_4 \rightarrow \gamma$-$Ca_2SiO_4$. Предложены и испытаны варианты повышения прочности агломерата путем физической и кристаллохимической стабилизации высокотемпературной модификации C_2S.

Физическая стабилизация C_2S агломерата повышается при упрочнении его структуры за счет утолщения стенок между крупными порами, что достигается повышением высоты спекаемого слоя, путем улучшения его газопроницаемости. Задача решается заменой применяемой ранее импортной аглоруды полидисперсной рудой Яковлевского месторождения, которая в 3-4 раза улучшает окомкование шихты и позволяет довести высоту спекаемого слоя и прочность отечественного агломерата до передового зарубежного уровня, исключая при этом необходимость приобретения импортных высоковакуумных эксгаустеров.

Кристаллохимическая стабилизация C_2S в составе железорудного агломерата на практике обеспечивается введением в состав исходной агломерационной шихты оптимальной многокомпонентной добавки в виде отхода производства глинозема из бокситов – красного шлама. При этом повышаются на 5-10 % механическая и на 20-40 % «горячая» прочности агломератов и окатышей. Производительность агломашин и доменных печей возрастает на 5-10 %. На 2-2,5 % сокращается удельный расход кокса. При производстве железорудных окатышей красный шлам заменяет импортный бентонит.

Ключевые слова: черная и цветная металлургия, агломерат, агломерационные машины, доменные печи, экономия топлива, яковлевская полидисперсная руда, красные шламы.

Как цитировать эту статью: Трушко В.Л. Разработка импортозамещающих технологий повышения производительности агломерационных машин и прочности агломератов / В.Л.Трушко, В.А.Утков // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.675-680. DOI 10.18454/PMI.2016.5.675.

Введение. Железную руду перед доменной плавкой в большинстве случаев подвергают обогащению. При этом после измельчения руды железорудный концентрат окусковывают методами брикетирования или изготовления обожженных окатышей и агломератов. Универсальным методом является агломерация, позволяющая утилизировать возвратные пыли, шламы, окалину и отсеваемый перед доменной плавкой мелкий возврат агломератов и окатышей. Агломерат спекают с основностью (отношение CaO/SiO_2) преимущественно 1,2-1,4, чтобы не подавать в доменную печь сырой известняк.

При такой основности существует проблема взрывного саморазрушения прочного горячего агломерата при его охлаждении, что приводит к значительным экономическим потерям. Установлено, что увеличение количества мелочи агломерата в доменной шихте на каждый процент приводит к потере приблизительно на такую же величину производительности доменных печей и перерасходу дорогостоящего кокса [1, 2, 4].

Саморазрушение и вынос пыли агломерата при нагреве и восстановлении в доменной печи приводит к потере чугуна и повышает запыленность окружающей среды. Поэтому предотвращение этих явлений становится одной из актуальных экономических и экологических задач черной металлургии.

Методика исследований. Окомкование и получение агломерата проводилось в лабораторных условиях и на металлургических предприятиях в виде опытно-промышленных испытаний.

Особое внимание было уделено окомкованию агломерационной шихты.

Способность шихты к окомкованию [1-5, 10] определялась по выходу гранул крупностью +1,6 мм. В качестве показателя комкующих свойств аглоруды использовался коэффициент комкуемости, который отражает долю указанной фракции после окомкования от начального содержания:

$$K = \frac{P_2 - P_1}{M} \cdot 100\ \%,$$

где K– коэффициент комкуемости, %; P_2 – содержание фракции +1,6 мм после окомкования, г; P_1 – содержание фракции +1,6 мм до окомкования, г; M – масса комкуемого материала, г.

Поскольку существует практически линейная зависимость вертикальной скорости спекания агломерационной шихты от расхода просасываемого воздуха [3, 4, 11], то для определения потери напора при прохождении газа через слой спекаемой шихты использовалась формула Л.К.Рамзина:

$$\Delta p = Ah\omega^n,$$

DOI 10.18454/PMI.2016.5.675

где Δp – потеря напора через слой, Па; h – высота спекаемого слоя, мм; ω – средняя скорость газа, м/с; A, n – эмпирические коэффициенты, зависящие от структуры слоя шихты и от крупности и формы ее частиц. Коэффициент A является функцией плотности насыпного слоя ($\rho_{нас}$), эквивалентного диаметру частиц ($d_{экв}$) и высоты слоя (h), рассчитывается по формуле, предложенной И.С.Берсеневым:

$$A = \rho_{нас}\left(\frac{h}{d_{экв}}\right)^{0,37}.$$

Анализ результатов. Самопроизвольное разрушение спеченного доменного агломерата приносит большие экономические потери в металлургическом производстве. Увеличение количества мелочи (фр. 0-5 мм) в агломерате на каждый 1 % эквивалентно падению в таких же размерах производительности доменных печей и перерасходу доменного кокса [4].

Одна из главных причин этого явления – полиморфизм находящегося в составе наиболее массовых офлюсованных агломератов двухкальциевого силиката (C_2S). Переход $\beta\text{-}Ca_2SiO_4 \rightarrow \gamma\text{-}Ca_2SiO_4$ сопровождается увеличением объема кристаллической решетки на 10 %. Спеченный прочным при температуре 1200-1300 °С агломерат, охлаждаясь при температуре около 675 °С (указанного фазового перехода), внезапно начинает массово растрескиваться из-за возникших в затвердевшем теле спека внутренних напряжений. Природу этого явления подтверждает найденная [8] экстремальная зависимость прочности агломерата от его основности (отношения CaO/SiO_2) с минимумом прочности в пределах основности агломерата 1,2-1,35, где стекловидная оливиновая связка агломерата по составу приближается к C_2S.

Физическая стабилизация C_2S. У агломератов с основностью более 2-2,5 связка состоит из прочных ферритов кальция. Она противостоит возникающим внутренним напряжениям. Осуществляется физическая стабилизация C_2S. Количество мелочи в агломерате уменьшается на 10-15 %.

В обычных офлюсованных агломератах с основностью 1,2-1,4 физической стабилизации C_2S способствует монолитизация структуры спека. Она достигается повышением слоя спекаемой шихты [4]. На каждые дополнительные 10 см высоты спекаемого слоя сокращается количество мелочи (фр. 0-5 мм) в агломерате на 6-12 %. Полиморфизму образующегося двухкальциевого силиката в данном случае препятствует более плотная структура связующей среды и ее увеличенное количество.

Проблема состоит в том, что высота слоя спекаемой шихты лимитируется его газопроницаемостью. В общем случае она обеспечивается окомкованием шихты. Но оно затруднено все увеличивающимся в настоящее время количеством в шихтах аглофабрик плохо комкующихся железорудных концентратов.

Изыскание возможности повышения газопроницаемости таких шихт проводилось применительно к сырьевым условиям работы аглофабрики ООО «Тулачермет», где доля в рудной части шихты тонкоизмельченных концентратов достигает 70-80 %. Для исследований были взяты тонкоизмельченные концентраты комбината «КМА-руда», Стойленского ГОКа (СГОКа) и импортозамещающие украинскую аглоруду мартитовая и гидрогематитовая руды Яковлевского рудника. Газодинамические характеристики окомкованной шихты, содержащей концентрат «КМА-руда» и добавку руды Яковлевского рудника, приведены в табл.1.

Таблица 1

Газодинамические характеристики окомкованной шихты, содержащей концентраты «КМА-руда» и СГОКа и добавку руд Яковлевского рудника

Добавка, % по массе		КМА-руда			СГОК		
		$d_{экв}$, мм	A, ед.	$\Delta p/h$, Па/м	$d_{экв}$, мм	A, ед.	$\Delta p/h$, Па/м
Без добавок	0	0,22	37266	6123	0,29	32248	4698
Мартитовая руда	15	2,38	9609	1579	0,75	14812	2158
	30	2,86	9198	1340	1,01	13491	1965
	45	3,15	8645	1259	1,37	12524	1824
Гидрогематитовая руда	15	1,33	11246	1638	0,69	13905	2026
	30	2,75	9002	1311	0,94	14036	2045
	45	2,77	9212	1342	2,69	9647	1905

DOI 10.18454/PMI.2016.5.675

Данные табл.1 свидетельствуют о том, что полидисперсные руды Яковлевского рудника, отличающиеся большим содержанием железа и вяжущей тонкодисперсной фракцией, способны повышать газопроницаемость слоя агломерационной шихты с железорудными концентратами в 3-4 раза [7].

Новизна технологии защищена патентом [6].

Максимальная высота спекаемого слоя на отечественных аглофабриках (ПАО «Северсталь») в настоящее время составляет 400 мм, на передовых зарубежных (Япония, Китай) – 600-800 мм. Разработанная технология позволяет улучшить показатели прочности агломерата и довести высоту спекаемого слоя до передового уровня без затрат на приобретение импортных (японских) дорогостоящих высоковакуумных эксгаустеров.

Кристаллохимическая стабилизация C_2S. Кристаллохимическая стабилизация двухкальциевого силиката обеспечивается вводом в систему комплекса оксидов, изменяющих диаграмму состояния и образующих новые твердые растворы. Таких вариантов может быть множество. Один из них реализуется упрочнением железорудных офлюсованных агломератов вводом в исходную шихту красного шлама (КШ) – отхода боксита после его гидрохимической обработки при извлечении глинозема. КШ представляет собой комплекс стабилизирующих C_2S оксидов: железа, кальция, кремния, алюминия, калия, натрия, титана, ванадия и др.

Упрочняющие агломераты и окатыши – свойства КШ – были доказаны [9] весьма основательными лабораторными и промышленными испытаниями (табл.2).

Таблица 2

Результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний по использованию красных шламов при агломерации различных железных руд и концентратов

ПП	СИ	ОА	РС	КШ	ВСШ	УСС	УВХ	УПА	СВМ
1	Л	1,2	т.к.	1	250/160	25	10	15	6,8
				2	250/160	44	10	15	30,8
				3	210/210	14		14	4,2
2		1,3	т.к.	2	300/200	22	10	15	7,7
				1	600/200	8	10	10	10
				2	600/200	14	10	15	15
3		1,4	т.к+с.ш.	2	400/280	3,2	6,9	8	2,7
4	ОП	2	т.к.	0,9	220/220	2	2	3,5	7
5		1,25		1	250/250				18
6		1,35		1	180/80			4	3,0
				1,5	180/180				10
7	П	1,36	т.к.+р.м	2	420/420		10,0-12,0	5,0 10,0	2,0-3,0
8	П	2,0	т.к.+р.м	1,7-2,2	400/400	3	10	8	5
	Средние показатели (при соблюдении технологии)					3-7	5,8-8,0	5-10	2-5 %

Примечание. ПП – промышленные предприятия; СИ – стадия испытаний (Л – лабораторные; ОП – опытно-промышленные; П – промышленные); ОА – основность агломерата CaO/SiO_2; РС – рудное сырье (т.к. – тонкоизмельченный концентрат, р.м. – рудная мелочь; с.ш. – собственные шламовые отходы); КШ – содержание красного шлама в шихте, %; ВСШ – высота слоя шихты (опытная /обычная) мм; УСС – увеличение скорости спекания, %; УВХ – увеличение выхода «годного» (+10 мм) агломерата, % отн.; УПА – увеличение производительности агломерационной установки, %; СВМ – сокращение выхода мелочи 0-5 мм в агломерате после испытаний в барабане или в скипе доменной печи, %.

Кроме этого, выявлена способность КШ повышать не только механическую (табл.2), но и «горячую» прочность агломератов и окатышей – сопротивляемость разрушению при нагреве и восстановлении в шахте доменных печей. Образование пылевидной фракции 0-0,5 мм, выносимой из доменных печей, сокращается на 20 % от окатышей и на 40 % от агломератов (табл.3) за счет формирования более прочной их алюмоферритной связки.

DOI 10.18454/PMI.2016.5.675

Выявлено также, что КШ обладают вяжущими свойствами, дающими улучшение гранулируемости железорудных концентратов шихт агломератов и окатышей. В результате производительность агломерационных машин увеличивается на 5-10%.

Таблица 3

Влияние красного шлама на «горячую» прочность окатышей и агломератов

Вид спека	Связка	Образование фракций, мм			
		%		% относительно базового спека	
		+10 (+5)	0-0,5	+10 (+5)	0–0,5
Окатыши A	Бентонит	(61,4)	9,5	100	100
Окатыши B	КШ	(65,3)	7,8	106,4	82,1
Разница (B-A) = X		X1 = +3,9	X2 = –1,7	X3 = +6,4	X4 = –17,9
Окатыши C	Бентонит	82,2	0,89	100	100
Окатыши D	КШ	89,8	0,65	108,5	73,1
Разница (D-C) = X		X1 = +7,0	X2 = –0,24	X3 = + 8,5	X4 = –27,0
Средние по A-D		X1 = +5,4	X2 = –1,0	X3 = +7,4	X4 = –22,4
Агломераты A	–	55,7	9,47	100	100
Агломераты B	КШ	77,2	7,01	138,5	74,0
Разница (B-A)		X1 = +21,5	X2 = –2,46	X3 = +38,5	X4 = –26,0
Агломерат C	–	55,7	9,47	100	100
Агломерат D	КШ	82,2	4,13	147,6	43,6
Разница (D-C) = X		X1 = +26,5	X2 = –5,34	X3 = +47,6	X4 = –56,4
Среднее по A-D		X1 = +24,0	X2 = –3,9	X3 = +42,9	X4 = –41,2

Примечание. A, C – окатыши и агломераты базовые; B, D – окатыши и агломераты с добавлением красного шлама.

В производстве окатышей красный шлам можно заменить импортным бентонитом, более дорогостоящим, но не способным повышать «горячую» прочность окатышей [9].

В некоторых видах красного шлама содержатся повышенные количества серы и фосфора, которые ухудшают качество металла, и щелочей, отрицательно влияющих на прочность футеровки доменных печей.

Испытаниями обжига окатышей из КШ установлено [8], что количество этих примесей в красных шламах перед доменной плавкой может быть сокращено в процессах спекания агломератов и окатышей на 20-40 % (рис.1, 2). Получены положительные результаты использования упрочненных красным шламом агломератов и окатышей в представительных по времени доменных плавках на трех промышленных предприятиях.

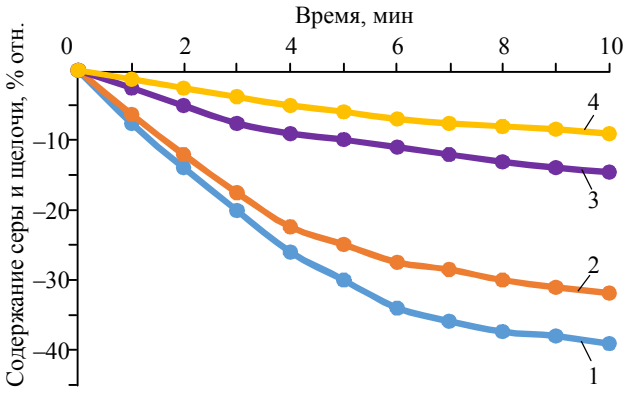


Рис.1. Изменение содержания серы и щелочи в окатышах из КШ при различных температурах окислительного обжига:

1 – сера (1150 °С); 2 – сера (1000 °С); 3 – щелочь ΣR_2O (1150 °С); 4 – щелочь ΣR_2O (1000 °С)

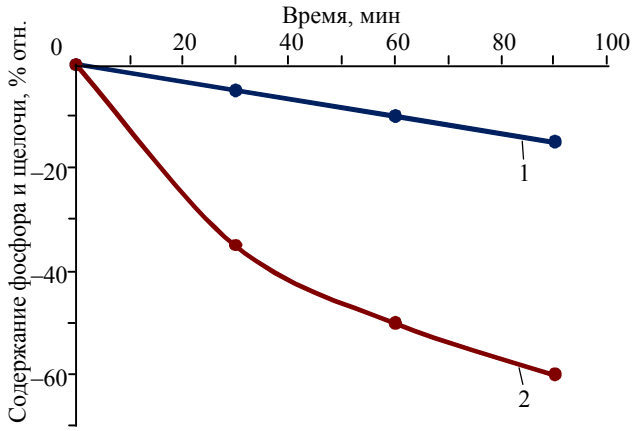


Рис.2. Изменение содержания фосфора и щелочи при восстановительном обжиге окатышей из КШ:

1 – фосфор; 2 –щелочь ΣR_2O

DOI *10.18454/PMI.2016.5.675*

В табл.4 приведены результаты использования КШ в аглодоменном производстве черной металлургии по нашим технологиям.

Таблица 4

Суммарные результаты лабораторных и промышленных испытаний использования КШ в аглодоменном производстве черной металлургии

Выполненные работы	Количество экспериментов или промышленных испытаний (сырьевых вариантов)	Увеличение производительности, %	Уменьшение выхода мелочи после испытаний на прочность, % отн.	Экономия технологического топлива, %
Лабораторные чашевые спекания	Более 130 (21)	8-15	3-5 (7-20)	4-15
Испытания на агломерационных фабриках	8 (7)	5-10	3-5 (10-15)	8-10
Гарантируемые показатели		**5-10**	**3-5 (10-15)**	**8-10**
Испытания в доменном производстве	4 (4)	1,2-2,5	4-6 (12-17)	1,5-1,8
Гарантируемые показатели		**1,2-2,5**	**4-6 (12-17)**	**1,5-1,8**

Использование красных шламов в металлургии и других производствах [12-15] решает также важную экологическую проблему по ликвидации шламохранилищ, в которых накоплено более 500 млн т отходов алюминиевой промышленности. Поэтому целесообразно строительство отгрузочных комплексов красного шлама вместо шламохранилищ с расчетной окупаемостью инвестиций за 3-5 лет.

Выводы

1. Выявлена одна из главных причин разупрочнения массовых промышленных офлюсованных железорудных агломератов, происходящего при их охлаждении – полиморфизм двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S); предложены варианты физической и кристаллохимической стабилизации высокотемпературной модификации этого соединения.

2. Физическая стабилизация обеспечивается упрочнением связующей среды агломератов, противостоящей внутренним напряжениям, за счет повышения основности (отношения CaO/SiO_2) агломерата от 1,2-1,5 до 2-5 и монолитности его макроструктуры путем увеличения высоты спекаемого слоя.

3. Увеличение в 3-4 раза газопроницаемости шихты достигается добавкой полидисперсной фракционированной аглоруды Яковлевского месторождения, что позволяет поднять высоту спекаемого слоя и качество агломерата до передового зарубежного уровня без импортных высоковакуумных эксгаустеров.

4. Кристаллохимическая стабилизация $2CaO \cdot SiO_2$ с упрочнением агломерата обеспечивается введением в исходную шихту многокомпонентного отхода производства красного шлама (КШ), при термообработке которого путем агломерации и обжига окатышей из него удаляются избытки серы и фосфора.

5. Установлено, что красные шламы не только заменяют импортный бентонит при производстве железорудных окатышей и агломератов, но и повышают их «горячую» прочность-сопротивляемость разрушению в шахте доменных печей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газодинамические особенности слоя исходной аглошихты / И.С.Берсенев, Б.А.Боковиков, В.И.Клейн, А.А.Кутузов, Ю.Г.Ярошенко // Сталь. 2010. № 9. С.16-18.

2. Газодинамические характеристики агломерационных шихт / Л.К.Герасимов, Л.Г.Журавлева, Ю.А.Фролов, Г.Г.Добряков // Известия вузов. Черная металлургия. 1984. № 2. С.31-32.

3. *Коротич В.И.* Агломерация рудных материалов / В.И.Коротич, Ю.А.Фролов, Г.Н.Безденежный / УГТУ-УПИ. Екатеринбург. 2003. 400 с.

4. Металлургия чугуна / Е.Ф.Вегман, Н.Ф.Жеребин, А.Н.Похвиснев, Ю.С.Юсфин, И.Ф.Курунов, А.Е.Пареньков, П.И.Черноусов. М.: Академкнига. 2004. 774 с.

5. *Панычев А.А.* Математическая модель процесса агломерации для его оптимизации и автоматизации // Обогащение руд. 2006. № 2. С.29-31

6. Пат.2552218 РФ. Способ подготовки агломерационной шихты к спеканию / В.Л.Трушко, В.А.Утков, А.С.Клямко. Опубл.10.06.2015. Бюл. № 17.

7. *Трушко В.Л.* Исследование технологических свойств аглоруды Яковлевского месторождения / В.Л.Трушко, В.А.Утков, А.С.Клямко // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 52-56.

8. *Утков В.А.* Моделирование зависимости прочности агломератов от их основности / В.А.Утков, О.В.Зырянова // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86. № 3. С.336-339.

9. *Утков В.А.* Переработка отвальных шламов в качестве элементов высокотехнологичной малоотходной технологии производства глинозема из бокситов и нефелинов // Технико-экономический Вестник РУСАЛа. 2007. № 18. С. 51-56.URL: http://www.aluminium-lider.com.

10. *Утков В.А.* Уменьшение содержания щелочей, серы и фосфора при термическом окусковании красного шлама / В.А.Утков, Л.И.Леонтьев, М.Г.Яковлев // Сталь. 2013. № 2. С.12-13.

11. *Фролов Ю.А.* Метод газодинамического расчета сети агломерационных машин для реконструкции и проектирования / Ю.А.Фролов, Г.Н.Безденежный, Б.М.Баронбаев // Цветная металлургия. 2002. № 8-9. С.10-15.

12. *Ercag E.* Furnace smelting and extractive metallurgy of red mud. Recovery of TiO_2, Al_2O_3 and pig iron / E.Ercag, R.Apak // J.Chem. Technol. Biotechnol. 1997. Vol.70. P.241-246.

13. Production of iron nuggets using iron rich red mud by direct reduction / Wang Hong, She Xue-feng, Zhao Qing-qing et al. // J. Process Eng. China. 2012. Vol.12. № 5. P.816-821 .

14. *Mohapatra B.K.* Proceedings of the Technical Sessios / B.K.Mohapatra, B.K.Mishra, C.R.Mishra // TMS Annual Meeting and Exhibition. Febr. 27 – March 3, 2011. San Diego, Calif. P.140-145.

15. Recovy of Alumina ferric oxid from Baer red mud rich in iron by reduction sintering / Li Xiao-bin, Xiao Wei, Liu Wie et al. // Trans Nonferrous Metals Soc. China. 2009. Vol.19. N 5. P.1342-1347.

Авторы: **В.Л.Трушко,** *д-р техн. наук*, *профессор*,*trushko@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*), **В.А.Утков,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *utkovva@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*).

Статья принята к публикации 15.08.2016.