

УДК 622.788.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АГЛОМЕРИРУЕМОГО СЛОЯ

*Кривенко С.В., к.т.н., доцент кафедры математических методов
и системного анализа (ksv-pgtu@rambler.ru)*

Мариупольский государственный университет
(87500, Украина, Донецкая обл., Мариуполь, пр. Строителей, 129а)

Аннотация. Исследованы процессы формирования зон в слое. Разработана новая методика исследования зоны переувлажнения в слое путем его выгрузки из спекательной чаши с сохранением структуры. Агломерационную шихту окомковывали с использованием расплава парафина вместо воды. Разрушение гранул в зонах с сухой шихтой над зоной переувлажнения образует зону мелких фракций высотой примерно 6 мм с низкой газопроницаемостью. Зона мелких фракций увеличивает потери давления в 1,4 раза и усадку слоя на 20 – 25 мм. Мелкие фракции формируют каналный ход газов в зоне переувлажнения, закупоривая каналы диам. менее 0,6 мм. Для повышения эффективности агломерационного процесса необходимо снижать негативное влияние на газопроницаемость слоя разрушения гранул в зоне сушки, интенсивного нагрева, а также в зоне переувлажнения.

Ключевые слова: агломерация, окомкование, газопроницаемость, зона переувлажнения, усадка слоя, структура слоя, парафин, разрушение гранул.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-581-586

Увеличение высоты агломерируемого слоя способствует более рациональному использованию теплоты горения топлива шихты и совершенствованию температурно-теплого режима в нем. Однако без улучшения газопроницаемости слоя невозможно достичь оптимальных соотношений скоростей движения газов в слое и горения топлива шихты [1]. При агломерации железорудных материалов по высоте слоя образуются несколько зон с характерными процессами. Определяющим является горизонт с максимальной температурой – зона плавления, в которой происходит горение топлива шихты. Высокие технико-экономические показатели агломерационного процесса могут быть достигнуты только при интенсивном поступлении кислорода в спекаемый слой.

Для улучшения газопроницаемости слоя и уравнивания тепловых процессов при агломерации шихту предварительно окомковывают с использованием воды, которая служит связующим веществом для образования гранул. За счет этого в спекаемом слое возникают зоны, ухудшающие его газодинамические характеристики [1 – 4].

В работах [2 – 5] указано, что одной из основных причин ухудшения газопроницаемости слоя во время спекания является конденсация влаги в зоне переувлажнения, которая заполняет пустоты для прохождения газов. Происходит снижение порозности с 0,35 до 0,31, и потери напора увеличиваются примерно в 1,25 раза. Кроме того, избыток влаги уменьшает прочность гранул, в результате давления вышележащих слоев происходит их деформация.

Однако влага в большей мере должна скапливаться в местах, где скорость движения газов низкая, и эффективная порозность слоя снизится в меньшей степени. Для деформации гранул в зоне переувлажнения необходимы силы, давящие на ее поверхность сверху. Вместе с тем зона готового агломерата образует прочный скелет, удерживающий верхние слои.

Изучение явлений, происходящих в слое при образовании зоны переувлажнения, исследователи осуществляли по различным методикам. Однако они в большей мере основаны на косвенных показателях (рассеве, температуре, влажности и т.д.), не позволяющих непосредственно рассмотреть зону переувлажнения изнутри [2, 3, 5 – 9].

Поэтому актуальными являются исследования, направленные на изучение процессов формирования зон в слое и улучшение условий движения газов в каждой из них.

Цель настоящей работы – развитие научных представлений о зональной структуре агломерируемого слоя и движении газов в нем. Для реализации поставленной задачи разработана новая методика исследования зоны переувлажнения в слое путем его выгрузки из спекательной чаши с сохранением структуры.

Агломерационную шихту окомковывали с использованием расплава парафина вместо воды. Температура плавления парафина составляет примерно 55 – 60 °С, испарение его начинается при температуре более 120 °С [10]. Шихту и парафин предварительно нагревали в жаровом шкафу примерно до 100 °С. Сравнение вязкостей с помощью стеклянного капиллярного виско-

зиметра показали, что при такой температуре вязкость расплава парафина выше вязкости воды в 1,31 раза. В связи с тем, что управление окомкованием осуществляли изменением расхода расплава парафина, то отличия в связующих свойствах не имеют существенного значения для результатов исследований структуры слоя.

Окомкование производили в тарельчатом грануляторе, также предварительно нагретом до 100 – 110 °С. За время окомкования (около 100 с) температура шихты и гранулятора изменялась несущественно.

Для проверки идентичности условий при использовании воды и расплава парафина были проведены окомкования одинаковых по составу шихт: 59,27 % концентрата; 16,39 % аглоруды; 18,54 % известняка; 5,80 % топлива (коксыка); 25,00 % возврата от массы шихты. Содержание добавляемого связующего вещества (воды или парафина) составило $W = 8,2$ %. Содержание концентрата в железорудной части шихты составило 78,3 %. Основность шихты $CaO/SiO_2 = 1,13$.

После окомкования шихту рассеивали вручную при помощи набора стандартных круглых сит на семь классов по крупности: более 10; 10 – 7; 7 – 5; 5 – 3; 3 – 2; 2 – 1; 1 – 0 мм. Для придания гранулам прочности и устранения залипания сит окомкованную шихту высушивали двое суток до естественной влажности.

Шихта, окомкованная с использованием расплава парафина, полностью застывала за 4 – 5 ч с образованием прочных гранул.

В проведенных исследованиях использовали объемное распределение гранулометрического состава [11]. Объемную долю частиц каждого класса крупности определяли по выражению

$$[V_i] = \frac{V_i}{\sum V_i} 100 \%,$$

где V_i – насыпной объем гранул каждого класса крупности, м³.

Для каждого класса крупности различия в диаметрах незначительные, поэтому порозности слоев примерно одинаковые. Значения V_i определяли по объему слоя в мерном стакане. Объемные доли каждого класса крупности для шихты, окомкованной с добавлением воды и расплава парафина, приведены в таблице. Из результатов рассеивов при температуре $t_{п} \approx 100$ °С можно заключить, что комкующие свойства расплава пара-

фина практически такие же, как и воды. Отклонения в содержании мелких фракций обусловлены тем, что после сушки шихта, окомкованная водой, при рассеиве разрушается в большей мере. Сравнение массовых гранулометрических составов даст более существенные различия в связи с тем, что при рассеиве высушенной шихты в мелкую часть (< 1 мм) частично перейдет концентрат, отпавший с поверхности гранул и обладающий высокой плотностью.

Полное спекание слоя шихты, окомкованной расплавом парафина, невозможно с использованием типового агломерационного оборудования. Из-за того, что пары парафина накапливаются в газоотводящих трактах, возможно их воспламенение, особенно, когда зона горения приблизится к колосниковой решетке. Поэтому во время проведения исследований с целью устранения загорания шихты из ее состава исключено твердое топливо. Вредное влияние парафина также проявляется в том, что его пары охлаждаются и осаждаются внутри газоотсосного оборудования, в частности, на лопастях эксгаустера, ухудшая его эксплуатационные характеристики.

При проведении исследований зоны переувлажнения шихта состояла из 26,7 % аглоруды; 53,3 % концентрата; 20 % известняка; 29,9 % возврата. Количество расплава парафина на окомкование составляло до 6,7 %. Высота формируемого слоя составила 180 мм. Разрежение под слоем 950 мм. вод. ст. На колосниковой решетке был уложен постельный слой из возврата крупностью 5 – 7 мм и высотой примерно 7 мм. Зажигание шихты осуществляли газовой горелкой в течение 60 с. Температура отходящих газов за время загорания возросла с 52 до 78 °С. Усадка слоя при зажигании составила 25 – 30 мм, что соответствует усадке при использовании воды для окомкования шихты.

Для большей адекватности реальным условиям формирования зоны переувлажнения слой агломерируемой шихты формировали из горячей шихты с температурой более 70 °С, при которой парафин находился в расплавленном состоянии. Вероятно, что начальная температура шихты не имела существенного значения, потому что при создании разрежения под слоем холодный воздух, движущийся в слое, охлаждал шихту. При зажигании газовой горелкой тепла отходящих газов достаточно, чтобы быстро разогреть парафин внутри слоя до жидкого состояния.

Объемный гранулометрический состав окомкованной аглошихты

Volumetric particle size distribution of pelletized sinter charge

Связующее	Объемные доли, %, фракции крупности, мм						
	<1	1 – 2	2 – 3	3 – 5	5 – 7	7 – 10	>10
Вода	2,12	6,49	18,63	39,34	20,28	8,52	4,62
Расплав парафина	1,91	5,45	19,07	39,72	21,52	8,75	3,58

Интенсивного горения парафина в слое не происходило, так как он большей частью испарялся в зоне сушки. Температура воспламенения паров парафина составляет примерно 550–700 °С и при недостатке кислорода намного повышается. Скорость движения температурного фронта вниз позволяет парафину практически полностью испариться и перенестись газами в нижележащий слой шихты, т.е. процессы, происходящие в слое при использовании воды и парафина, идентичны.

По окончании процесса зажигания эксгаустер выключали и в течение суток ожидали, пока температура внутри слоя понизится до застывания парафина. Затем слой выгружали из спекательной чаши и исследовали сформировавшиеся зоны.

Общая масса шихты, загруженной в аглочашу, составила 4,81 кг. Масса выгруженного из чаши слоя также составила 4,81 кг. Для принятых условий масса слоя должна была уменьшиться на количество унесенных паров парафина, пыли, газа CO_2 от разложения известняка и газов от горения парафина. На возврате постельного слоя следов парафина не наблюдали. Следовательно, его пары не уносились отходящими газами, а полностью конденсировались в слое. Пыль шихты также не уносилась из слоя, так как его масса не изменилась.

Для лучшего изучения структуры слой разрезали вертикально. Схема образовавшихся зон в слое при зажигании шихты показана на рис. 1.

Вверху слоя высотой $H_{\text{г.т}} \approx 10$ мм сформировалась зона спеченной шихты. Из-за того, что в шихту не добавляли мелкий кокс, первичный агломерат образовался в большей мере за счет тепла от сгорания природного газа зажигательной горелки и частично парафина шихты.

Зона горения топлива из-за его отсутствия не образовалась.

Высота зоны высушенной шихты равна $H_{\text{с.ш}} \approx 20 - 25$ мм и включает в себя зоны сушки и интенсивного нагрева.

Высота зоны интенсивного нагрева составила $H_{\text{и.н}} \approx 10 - 15$ мм. Для нее характерно наличие белых частиц диссоциировавшего известняка.

В зоне высушенной шихты наблюдали изменение цвета шихты на красноватый оттенок, вероятно, магнетит (Fe_3O_4) концентрата окислился до гематита (Fe_2O_3). Гранулы крупностью до 3 мм меняли свой оттенок по всему диаметру. Более крупные гранулы внутри свой оттенок не изменили, а окислились примерно на глубину до 1,5 мм. Такое явление происходило из-за недостатка восстановительных газов CO и H_2 вследствие отсутствия топлива в шихте при высокой температуре и избытке кислорода движущихся газов. Это возможно и для типового агломерационного процесса в начальный период зажигания, когда топливо еще не зажглось или горит недостаточно интенсивно, а температура газов,

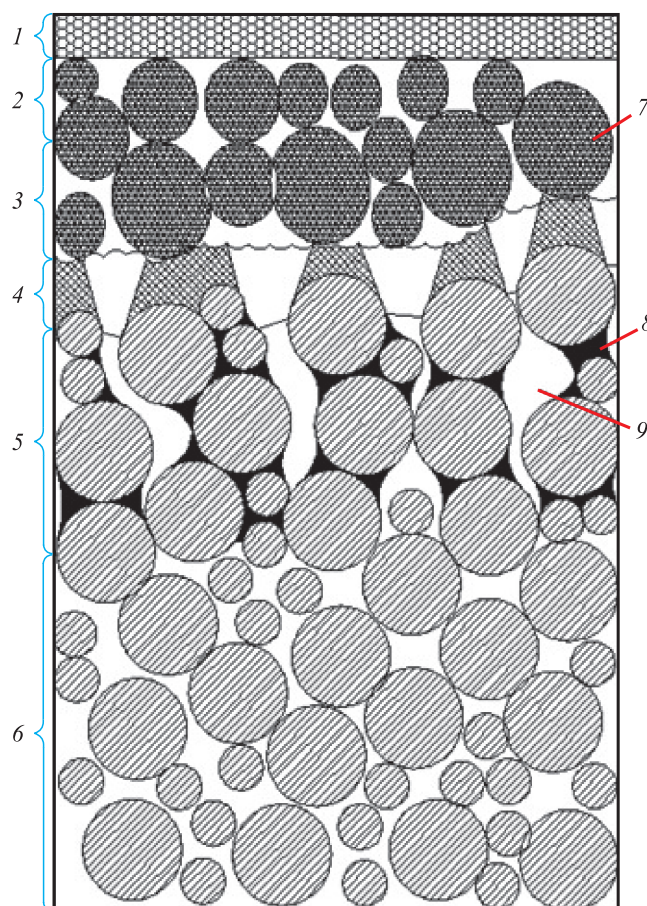


Рис. 1. Сформированные зоны в исследуемом слое шихты без топлива:

- 1 – спеченной шихты; 2 – интенсивного нагрева;
3 – сушки; 4 – мелких фракций; 5 – переувлажнения; 6 – исходной шихты; 7 – сухие гранулы; 8 – мениски; 9 – каналы

Fig. 1. Formed zones in the investigated layer of the charge without fuel:
1 – sintered layer of charge; 2 – intensive heating zone; 3 – drying;
4 – fines; 5 – waterlogged zones; 6 – initial charge; 7 – dry granules;
8 – meniscus; 9 – channels

входящих в слой, достаточно высокая. Поэтому снижение массы слоя за счет удаления газов от разложения известняка и горения парафина, вероятно, частично компенсировалось добавлением кислорода в оксиды железа.

Гранулометрический состав зоны высушенной шихты содержал 25–30 % фракций крупностью менее 0,5 мм. Особенно интенсивно разрушились высушенные гранулы крупностью менее 3 мм. Это объясняется низкой прочностью сцепления пылеватых фракций на поверхности гранул из-за отсутствия связующего вещества. Сцепление происходит только под воздействием механических сил. Скелет этой зоны в основном состоял из крупных гранул, внутри которых располагались частицы руды или возврата.

При образовании более плотных гранул с оптимальными динамическими нагрузками во время окомкования доля пылеватых фракций в указанных зонах будет снижаться.

Высота зоны конденсации паров парафина («переувлажнения» по аналогии с типовым агломерационным процессом) составила примерно 50 – 60 мм (рис. 2). Вследствие перераспределения парафина в зону переувлажнения максимальное его содержание составило 11 – 12 %. Эта зона представляет гранулы, соединенные между собой образовавшимися вертикальными менисками. При этом наблюдается образование волнообразных вертикальных каналов для движения газов со средним диаметром $d_k \approx 0,6 - 1,2$ мм и отдельных пустот. Пары парафина из верхних слоев шихты, смешанные с пылью, конденсируются в объемах, где скорость движения газов наименьшая. Такие застойные объемы в слое окомкованной шихты в большей части располагаются под гранулами. Это объясняет образование волнообразных каналов в зоне переувлажнения.

Количество N_k каналов зависит от крупности гранул окомкованной шихты и степени их разрушения в сухих зонах. Для проведенных исследований $N_k = 7 \div 12 \text{ см}^{-2}$, что соответствовало порозности слоя $\varepsilon = 0,25 \div 0,32$.

Стекания капель парафина в зоне переувлажнения не наблюдали.

В результате исследования выгруженного слоя обнаружено, что на поверхности зоны переувлажнения образовалась зона из мелких фракций крупностью менее 0,3 мм, в большей части перенесенных из зоны высушенной шихты. Эти фракции образуют достаточно плотную зону высотой $H_{м.ф} \approx 6$ мм и забивают каналы с диаметром менее 0,6 мм с низким расходом газа. Данная зона обладает очень низкой газопроницаемостью и

прижимает нижележащую шихту, способствуя усадке слоя и формируя каналы.

Зона переувлажнения и зона мелких фракций во взаимодействии ограничивают скорость перемещения теплового фронта. По капиллярам, образованным мелкими фракциями, вода из зоны переувлажнения стремится вверх и сцепляет частицы между собой. Поэтому мелкие фракции образуют достаточно прочную и плотную корку и препятствуют распространению тепла в зону переувлажнения, изолируя горячую шихту от поверхности влажных гранул шихты.

Высота зоны мелких фракций существенно влияет на качество производимого агломерата и показатели процесса. Наряду с зоной переувлажнения в зоне мелких фракций свойства последних позволяют обеспечивать соблюдение принципа Войса [2]. При чрезмерном количестве мелких фракций высота слоя большая, и газы движутся с низким расходом для обеспечения интенсивного горения топлива шихты. При малом количестве мелких фракций движущиеся газы через слой и тепловой фронт перемещаются со слишком большой скоростью. В результате низкая температура в этой зоне не позволяет получить прочную структуру агломерата, полностью пропитанную легкоплавкими соединениями.

Зона мелких фракций перемещается в процессе спекания сверху вниз вместе с зоной переувлажнения. В конце процесса спекания, когда зоны переувлажнения уже не существует или влаги шихты недостаточно для сцепления мелких частиц, они выходят с газами, не фильтруясь. Это объясняет увеличение запыленности отходящих газов к концу процесса спекания.

Каналы в зоне переувлажнения



Исходная шихта

Рис. 2. Структура зоны переувлажнения

Fig. 2. Structure of the waterlogged zone

Для подтверждения влияния зоны мелких фракций на газодинамику агломерационного процесса были проведены дополнительные исследования.

В агломерационной чаше сформировали слой окомкованной шихты следующего состава: 15,3 % аглоруды; 61,3 % железорудного концентрата; 15,3 % известняка; 1,8 % извести; 6,1 % мелкого кокса (0–3 мм); 35 % возврата (0–5 мм) от массы шихты. Общая масса шихты 4,7 кг. Количество добавленной влаги при окомковании 9,4 %. Создавали разрежение под слоем $\Delta P_n = 500$ мм. вод. ст. Расход воздуха через слой составил $Q = 1,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Высота слоя $H_{\text{сл}} = 170$ мм.

Затем имитировали образование зоны переувлажнения равномерным распылением воды на поверхность шихты. На рис. 3 представлено изменение потерь давления в слое при увеличении влажности шихты. Расход воздуха через слой существенно снизился с увеличением разрежения под слоем до 525 мм вод. ст. и составил $Q = 1,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Затем изменение расхода было несущественным, т.е. сохранялась структура слоя, которая мало влияла на сопротивление движению газов. Усадка слоя также была несущественная (примерно 5 мм). Формирования каналов в зоне увлажнения сверху не наблюдали. Гранулы сохраняли свою форму, так как лишняя влага переходила вниз.

Существенное увеличение потерь ΔP (более 1500 мм вод. ст.) произошло при добавлении в слой воды более 21 % (абс.). Усадка при этом составила более 40 мм, и гранулы полностью разрушились. Согласно исследованиям, влажность в зоне переувлажнения может увеличиваться примерно на 1,5–4,0 % (абс.) [1]. Поэтому такое существенное переувлажнение для агломерационного процесса не типично и его можно исключить. При изменении влажности шихты W на 1,5–4,0 % удельное ухудшение газопроницаемости составляет 25 мм. вод. ст./% (рис. 3).

Следующими исследованиями имитировали образование зоны мелких фракций над зоной переувлажнения.

В агломерационной чаше формировали слой окомкованной шихты. Состав шихты, разрежение под слоем и другие условия проведения этого опыта аналогичны предыдущему. Распылили влагу через поверхность слоя до значений $W \approx 12$ %, имитируя образование зоны переувлажнения. Затем на слой переувлажненной шихты сверху равномерно нанесли мелкие частицы (менее 0,5 мм). При этом резкое ухудшение газопроницаемости слоя произошло даже при высоте слоя мелких частиц около 3 мм.

При высоте сформированной зоны примерно 6 мм разрежение под слоем резко возросло в 1,4 раза и составило 750 мм. вод. ст. Началось образование каналов диаметром более 0,6 мм. Из-за возрастания разрежения силы, давящие сверху на слой, намного выше, чем без зоны мелких фракций. Поэтому усадка слоя намного существеннее при меньшей влажности шихты и составляет 20–25 мм.

Таким образом, выводы о существенном влиянии зоны мелких фракций на формирование каналов в зоне переувлажнения и увеличении потерь давления в слое подтвердились. Для повышения эффективности агломерационного процесса необходимо снижать негативное влияние на газопроницаемость слоя разрушения гранул в зоне сушки, интенсивного нагрева, а также в зоне переувлажнения. Для этого должен быть применен комплекс мероприятий, включающий оптимизацию режима окомкования шихты [12, 13] и ее предварительный подогрев [14, 15].

Выводы. Разрушение гранул в зонах с сухой шихтой над зоной переувлажнения приводит к образованию зоны мелких фракций высотой около 6 мм с низкой газопроницаемостью, которая увеличивает потери давления в 1,4 раза и усадку слоя на 20–25 мм. Мелкие фракции формируют каналный ход газов в зоне переувлажнения, закупоривая каналы диам. менее 0,6 мм.

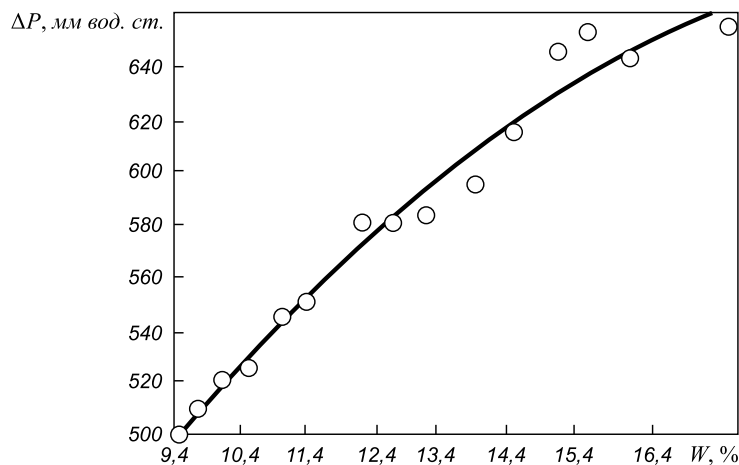


Рис. 3. Изменение потерь давления в слое при увеличении средней влажности шихты

Fig. 3. Changes in pressure losses in the layer at increase in average humidity of the charge

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берштейн Р. С., Станишевский Б.А., Быткин В.Н. Совершенствование технологии спекания агломерата. – Днепропетровск: Промінь, 1975. – 120 с.
2. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2003. – 400 с.
3. Петрушов С.Н. Современный агломерационный процесс. – Алчевск: изд. ДонГТУ, 2006. – 360 с.
4. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М.: Metallurgiya, 1967. – 368 с.
5. Wolfgang Pietsch Agglomeration Processes. Phenomena, Technologies, Equipment / Wolfgang Pietsch. - Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002. – 647 p.
6. Hao Zhou. Model Predictions of Important Bed and Gas Properties during Iron Ore Sintering / Hao Zhou, Jia Pei Zhao, Chin Eng Loo, Benjamin George Ellis and Ke Fa Cen // ISIJ International. 2012. No. 12. P. 2168 – 2176.
7. Берсенева И.С., Ершов М.П., Клейн В.И. и др. Определение порозности шихты и аглоспека на агломашинах // Сталь. 2008. № 12. С. 34 – 36.
8. Коршиков Г.В., Хайков М.А., Кузнецов А.С. и др. Формирование структуры слоя шихты и спека на агломашинах АКМ-312

- при различных способах загрузки (в порядке обсуждения) // Сталь. 1996. № 11. С. 3 – 8.
9. Shinichi Yuu. Simulation of Sintering Process - Effects of Air Flow, Liquid Film Cohesion Force and Fixation Process on Large Scale Crack / Shinichi Yuu, Toshihiko Umekage and Osamu Ishiyama // ISIJ International. 2012. No. 10. P. 1785 – 1793.
10. Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянц и др. – М.: Советская энциклопедия, 1992. Т. 3. – 639 с.
11. Тарасов В.П., Тарасов П.В. Теория и технология доменной плавки. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
12. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Metallurgiya, 1966. – 152 с.
13. Кривенко С.В. Принцип синхронного управления частотой вращения окомкователя и влажностью шихты // Металл и литье Украины. 2011. № 8. С. 25 – 28.
14. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации. – М.: Metallurgiya, 1974. – 288 с.
15. Кривенко С.В., Томаш А.А., Русских В.П. Эффективность спекания подогретой шихты с применением обогащенного кислородом воздуха // Сталь. 2011. № 1. С. 2 – 7.

Поступила 14 июля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 8, pp. 581–586.

RESEARCH OF THE ZONAL STRUCTURE OF SINTERING LAYER

S.V. Krivenko

Mariupol State University, Mariupol, Ukraine

Abstract. The process of zones formation in the layer was investigated. A new research method was developed for the saturation zone in the layer by discharge of sintering bowls with the structure conservation. Sintering mixture was pelletized using of melt paraffin instead of water. The destruction of the granules in areas with a dry charge material above the zone of saturation forms a zone of fine fractions with a height of about 6 mm with low gas permeability. Zone of fines increases the pressure loss in 1.4 times and the shrinkage of the layer – by 20–25 mm. Fines form a channel course of the gases in the zone of saturation clogging the channels with a diameter less than 0.6 mm. Negative impact on the permeability of the destruction layer of the pellets in the drying zone – intensive heating zone – and the saturation zone should be reduced to improve the efficiency of the sintering process.

Keywords: sintering, pelletizing, permeability, saturation zone, shrinkage of the layer, layer structure, paraffin, granules destruction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-581-586

REFERENCES

1. Bershtein R.S., Stanishevskii B.A., Bytkin V.N. *Sovershenstvovanie tekhnologii spekaniya aglomerata* [Improvement of sintering technology]. Dnepropetrovsk: Promin', 1975, 120 p. (In Russ.).
2. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Sintering of ore materials]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2003, 400 p. (In Russ.).
3. Petrushev S.N. *Sovremennyyi aglomeratsionnyi protsess* [Modern sintering process]. Alchevsk: DonGTU, 2006, 360 p. (In Russ.).
4. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeratsiya* [Sintering]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 368 p. (In Russ.).
5. Wolfgang Pietsch Agglomeration Processes. *Phenomena, Technologies, Equipment*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002, 647 p.
6. Hao Zhou, Jia Pei Zhao, Chin Eng Loo, Benjamin George Ellis, Ke Fa Cen. Model predictions of important bed and gas proper-

- ties during iron ore sintering. *ISIJ International*. 2012, no 12, pp. 2168–2176.
7. Bersenev I.S., Ershov M.P., Klein V.I., Kutuzov A.A., Shipitsyn D.N., Yaroshenko Yu.G. Determining batch and cake porosity in sintering machines. *Steel in Translation*, 2008, vol. 38, no 12, pp. 1017–1019.
8. Korshikov G.V., Khaikov M.A., Kuznetsov A.S., Zevin S.L., Grekov V.V. Formation of the structure of the charge layer and cake in AKM-312 sintering machines with different loading methods (for discussion). *Steel in Translation*, 1996, vol. 26, no 11, pp. 1–9.
9. Shinichi Yuu, Toshihiko Umekage, Osamu Ishiyama. Simulation of sintering process – effects of air flow, liquid film cohesion force and fixation process on large scale crack. *ISIJ International*. 2012, no. 10, pp. 1785–1793.
10. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical encyclopedia]. Knunyants I.L. ed. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1992, vol. 3, 639 p. (In Russ.).
11. Tarasov V.P., Tarasov P.V. *Teoriya i tekhnologiya domennoi plavki* [Theory and technology of blast furnace smelting]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2007, 384 p. (In Russ.).
12. Korotich V.I. *Teoreticheskie osnovy okomkovaniya zhelezorudnykh materialov* [Theoretical basis of pelletizing of iron ore materials]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 152 p. (In Russ.).
13. Krivenko S.V. The principle of synchronous control of the pelletizer speed and of the charge humidity. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2011, no. 8, pp. 25–28. (In Russ.).
14. Vegman E.F. *Teoriya i tekhnologiya aglomeratsii* [Theory and technology of sintering]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 288 p. (In Russ.).
15. Krivenko S.V., Tomash A.A., Russkikh V.P. Sintering of preheated batch with oxygen-enriched air. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 1, pp. 31–35.

Information about the author:

S.V. Krivenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mathematical Methods and System Analysis (ksv_pgtu@rambler.ru)

Received July 14, 2016