

Формирование зон в агломерируемом слое

Разработана методика исследования зоны переувлажнения в слое путем его выгрузки из спекательной чаши с сохранением ее 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 ≈ 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 канальный ход газов в зоне переувлажнения, закупоривая каналы диаметром 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

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 уравновешивания тепловых процессов в типовом агломерационном процессе шихту предварительно окомковывают с использованием воды, которая служит связующим веществом для образования гранул. За счет этого в спекаемом слое возникают зоны сушки и переувлажнения, ухудшающие его газодинамические характеристики.

В работе [1] 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 в $\approx 1,25$ раза. Кроме того, избыток влаги уменьшает прочность гранул, и 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, осуществлялись различными методиками, но они в большей мере основаны на косвенных показателях (рассев, температура, влажность и т. д.), не позволяющих непосредственно рассмотреть зону переувлажнения изнутри [2].

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

Цель статьи – развитие научных представлений о формировании зон и движении газов в агломерируемом слое.

Для реализации поставленной задачи традиционный способ окомкования шихты с использованием воды не позволяет непосредственное исследование зоны переувлажнения в агломерируемом слое из-за нарушения целостности слоя.

Разработана методика исследования зоны переувлажнения в слое путем его выгрузки из спекательной чаши с сохранением ее структуры.

Агломерационную шихту окомковывали с использованием расплава парафина вместо воды. Температура плавления парафина составляет $t_{\text{пл}} \approx 55-60$ °С. Испарение парафина начинается при температуре $t_{\text{исп}}$ более 120 °С. Шихту и парафин предварительно нагревали в жаровом шкафу до ≈ 100 °С. Сравнение вязкостей с помощью стеклянного капиллярного вискозиметра 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 исследования структуры слоя.

Окомкование производили в тарельчатом грануляторе, также предварительно нагретом до 100-110 °С. За время окомкования (≈ 100 с) температуры шихты и гранулятора изменялись незначительно.

Для проверки возможности использования расплава парафина были проведены окомкования одинаковых по составу шихт, в % от массы шихты: концентрат – 59,27; аглоруда – 16,39; известняк – 18,54; топливо (коквик) – 5,80; возврат – 25,00. Количество добавляемого связующего вещества (воды или парафина) составило $W = 8,2$ %.

Содержание концентрата в железорудной части шихты соответствовало 78,3 %. Основность шихты $\text{CaO/SiO}_2 = 1,13$.

После окомкования шихту отсеивали вручную при помощи набора стандартных круглых сит на семь классов крупности, в мм: +10; 7-10; 5-7; 3-5; 2-3; 1-2; 0-1. Для придания гранулам прочности

и устранения залипания сит окомкованную шихту высушивали двое суток до естественной влажности.

Шихта, окомкованная на расплаве парафина, полностью застывала за 4-5 часов, образуя прочные гранулы.

Исходя из проведенных ранее исследований, массовая доля фракций не позволяет правильно рассчитать эквивалентный диаметр гранул и газодинамические характеристики слоя. Это объясняется зависимостью плотности гранул от их крупности. Кроме того, на функции плотности массового распределения проявляются максимумы, соответствующие крупности гранул с высокой плотностью. Функции плотности объемного распределения имеют один максимум. Поэтому в дальнейших исследованиях использовано объемное распределение гранулометрического состава.

Объемную долю частиц каждого класса крупности определяли по выражению

$$[V_i] = \frac{V_i}{\sum V_i} \cdot 100\%, \quad (1)$$

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

Для каждого класса крупности различия в диаметрах незначительные, поэтому порозности слоев примерно одинаковые. Насыпной объем гранул каждого класса крупности 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.

Исходя из результатов рассеивов (табл.), при температуре $t_n \approx 100$ °С комкующие свойства расплава парафина идентичны воде. Отклонения в содержании мелких фракций обусловлены тем, что после сушки шихта, окомкованная водой, при рассеве разрушается в большей мере. При сравнении массовых гранулометрических составов различия будут существеннее в связи с тем, что при рассеве 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 при использовании 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 при проведении исследований для

устранения зажигания шихты из ее состава исключено твердое топливо.

Вредное влияние парафина также проявляется в том, что его пары охлаждаются и отлаживаются внутри газоотсосного оборудования, в частности на лопастях эксгаустера, что ухудшает его эксплуатационные характеристики.

При проведении исследований зоны переувлажнения шихта состояла (% от массы шихты) из: аглоруды – 26,7; концентрата – 53,3 кг; известняка – 20; возврата – 29,9. Количество расплава парафина на окомкование добавлено 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 $H_{сн} \approx 7$ мм. Зажигание шихты осуществляли газовой горелкой в течение 60 с. Температура отходящих газов за время зажигания возросла с 52 до 78 °С.

Усадка слоя при зажигании составила 25-30 мм. Это соответствует ее величине 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 жидком состоянии. Вполне вероятно, что начальная температура шихты не имела существенного значения, так как при создании разрежения под слоем холодный воздух, движущийся в слое, охлаждал шихту. При зажигании газовой горелки тепла отходящих газов достаточно, чтобы быстро разогреть парафин до жидкого состояния.

Интенсивного горения парафина в слое не происходило, поскольку он большей частью испарялся в зоне сушки. Температура воспламенения $t_{восп}$ паров парафина составляет примерно 550-700 °С и при недостатке кислорода значительно повышается. Скорость движения температурного фронта вниз позволяет парафину практически полностью испариться и перенестись газами в нижележащий слой шихты, то есть процессы, происходящие в слое при использовании воды и парафина, идентичны.

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

Общая масса шихты, загруженной в аглошашу, составила 4,81 кг. Масса выгруженного из чаши слоя составила столько же. Для принятых условий масса слоя должна была уменьшиться на количество унесенных паров парафина, пыли, углекислого газа (CO₂) 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.

Объемный гранулометрический состав окомкованной аглошихты, %

Связующее вещество	Фракции, 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

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.

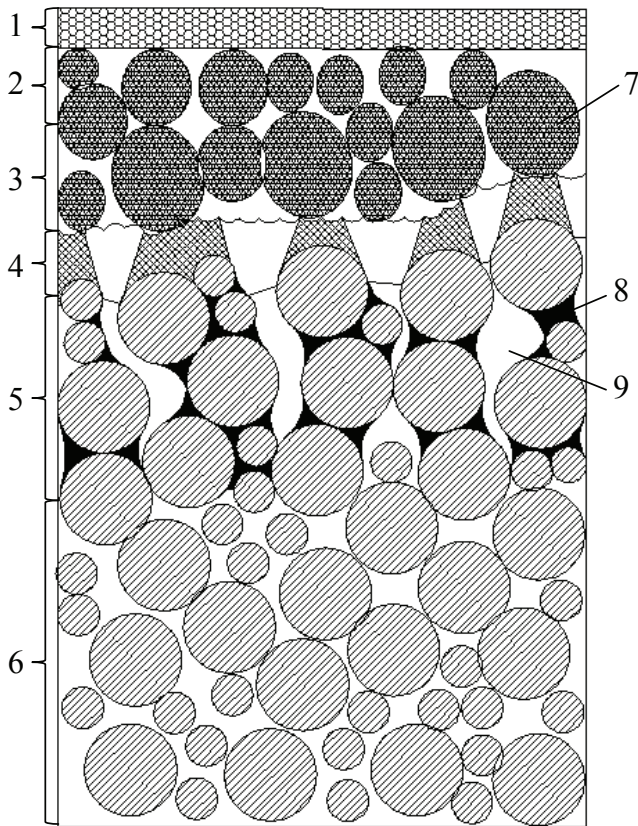


Рис. 1. Сформированные зоны в исследуемом слое шихты без топлива: 1 – спеченной шихты; 2 – интенсивного нагрева; 3 – сушки; 4 – мелких фракций; 5 – переувлажнения; 6 – исходной шихты; 7 – сухие гранулы; 8 – мениски; 9 – каналы

Вверху слоя высотой $H_{гт.} \approx 10$ 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 $H_{с.ш.} \approx 20-25$ мм, включает в себя зоны сушки и интенсивного нагрева.

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

В зоне высушенной шихты наблюдали изменение цвета шихты на красноватый оттенок, вероятно, магнетит концентрата Fe_3O_4 окислялся 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 на глубину до $\approx 1,5$ мм.

Данное явление происходило из-за недостатка восстановительных газов CO и H_2 из-за 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, входящих в слой, 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 разрушаются высушенные гранулы крупностью менее 3 мм. Это объясняется низкой прочностью сцепления пылеватых фракций на поверхности гранул при удалении связующего вещества. Сцепление происходит только под воздействием механических сил. Скелет данной 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 в барабане-окомкователе доля пылеватых фракций в указанных зонах будет снижаться.

Высота зоны конденсации паров парафина («переувлажнения» по аналогии с типовым агломерационным процессом) составила $\approx 50-60$ мм (рис. 2). Исходя из перераспределения парафина в зону переувлажнения (максимальное его содержание составило 11-12 %), которая представляет собой гранулы, соединенные между собой образовавшимися вертикальными менисками. При этом наблюдается образование волнообразных вертикальных каналов для

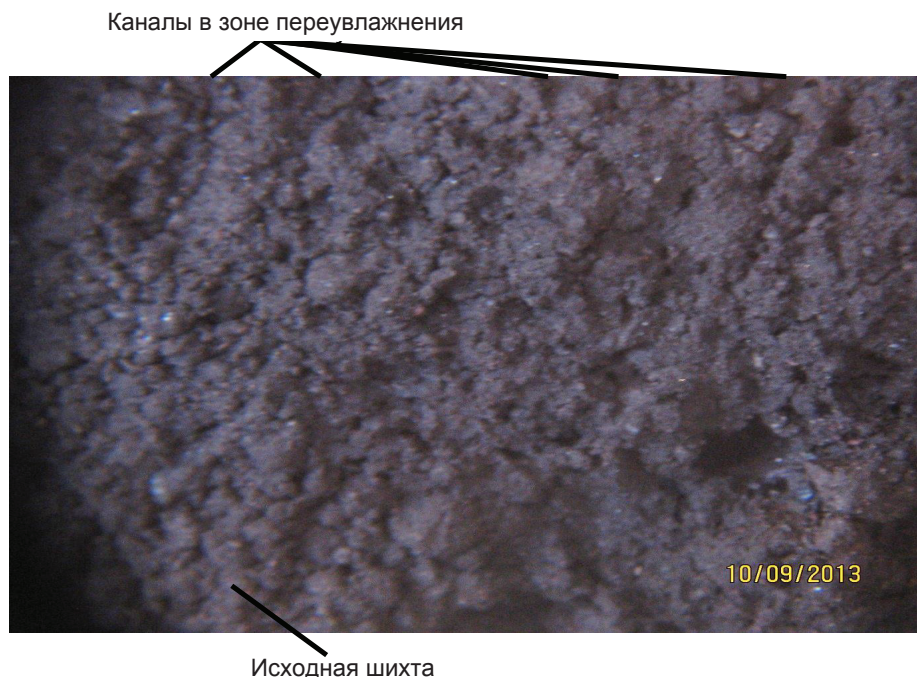


Рис. 2. Структура зоны переувлажнения

движения газов со средним диаметром $d_k \approx 0,6-1,2$ мм и отдельных пустот. Пары парафина из верхний 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 каналов N_k зависит от крупности гранул окомкованной шихты и степени их разрушения в сухих зонах. Для проведенных исследований $N_k = 7-12$ см⁻², что соответствовало порозности слоя $\varepsilon = 0,25-0,32$.

Образование и стекание 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, через которые расход газа уменьшается. 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 зоне 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 ее свойства позволяют обеспечивать соблюдение принципа Войса [2]. При чрезмерном количестве мелких фракций высота данного слоя большая и газы движутся с низким расходом для обеспечения интенсивного горения топлива шихты. При малом количестве мелких фракций движение газов через слой и тепловой фронт перемещаются со слишком большой скоростью. В результате низкая температура в зоне горения 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.

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

В агломерационной чаше формировали слой окомкованной шихты следующего состава, % от массы шихты: аглоруда – 15,3; железорудный концентрат – 61,3; известняк – 15,3; известь – 1,80; мелкий кокс (0-3 мм) – 6,1; возврат (0-5 мм) – 35,0. Общая масса шихты – 4,7 кг. Количество добавленной влаги при окомковании – 9,4 %. Создавали разрежение под слоем, которое составило $\Delta P_n = 500$ мм вод. ст. Расход воздуха через слой составил $Q_n = 1,8$ м³/(м²·с). Высота слоя – $H_{сн} = 170$ 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 при увеличении разрежения под слоем до 525 мм вод. ст. и составил $Q = 1,3$ м³/(м²·с). Затем изменение расхода Q было несущественным, то есть сохранялась структура слоя, которая на сопротивление движению газов мало влияла. Усадка слоя также была несущественная $\Delta H \approx 5$ мм. Формирование 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 на $\approx 1,5-4$ %_{абс.} [1]. Поэтому такое существенное переувлажнение для агломерационного процесса не типично и его можно исключить. При изменении влажности шихты на 1,5-4,0 %_{абс.} удельное ухудшение газопроницаемости составляет $\Delta P_{уд} = 25$ мм вод. ст. / % (см. рис. 3).

Следующими исследованиями имитировали образование зоны мелких фракций над зоной

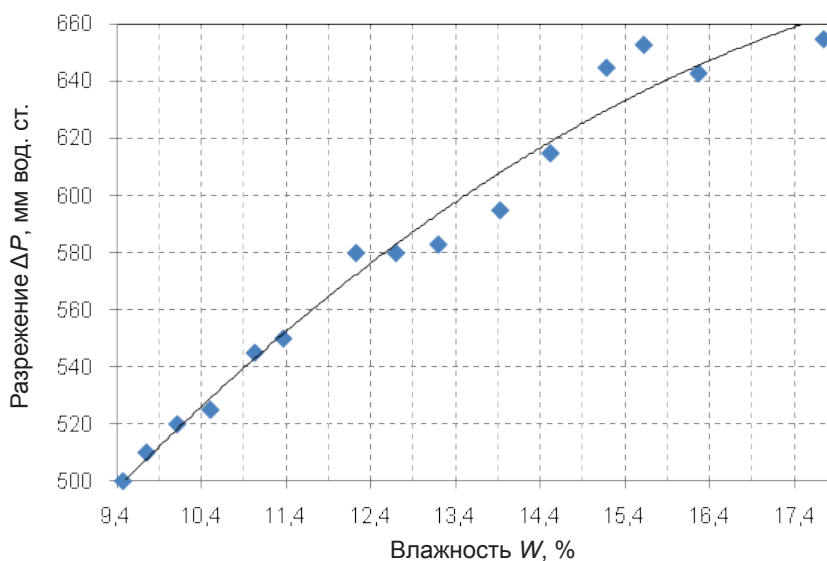


Рис. 3. Изменение потерь давления в слое при увеличении средней влажности шихты

переувлажнения. В агломерационной чаше формировали слой окомкованной шихты. Состав шихты, разрежение по слоям и другие условия проведения данного опыта аналогичны предыдущему. Распылили влагу через поверхность слоя до $W \approx 12\%$, имитируя образование зоны переувлажнения. Затем на слой переувлажненной шихты сверху равномерно нанесли мелкие частицы крупностью менее 0,5 мм. При этом резко ухудшение газопроницаемости слоя произошло даже при высоте слоя мелких частиц $H_{м.ф.} \approx 3$ мм.

При высоте сформированной зоны $H_{м.ф.} \approx 6$ мм разрежение под слоем резко возросло в 1,4 раза и составило 750 мм вод. ст. Началось образование каналов крупностью 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 равна $\Delta H = 20-25$ мм.

Таким образом, выводы о существенном влиянии зоны мелких фракций на формирование каналов в

зоне переувлажнения и увеличении потерь давления в слое подтвердились.

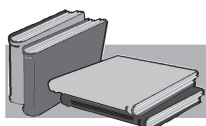
Для повышения эффективности агломерационного процесса необходимо снижать негативное влияние на газопроницаемость слоя разрушение гранул в зоне сушки, интенсивного нагрева, а также переувлажнения. Для этого должен быть применен комплекс мероприятий, включающий оптимизацию режима окомкования шихты [4] и ее предварительный подогрев [5, 6].

Выводы

Разрушение гранул в зонах с сухой шихтой над зоной переувлажнения образует зону мелких фракций высотой ≈ 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 канальный ход газов в зоне переувлажнения, закупоривая каналы диаметром менее 0,6 мм.



ЛИТЕРАТУРА

1. Коротич В. И. Агломерация рудных материалов / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Г. Н. Бездежский. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ». – 2003. – 400 с.
2. Петрушов С. Н. Современный агломерационный процесс. Монография / С. Н. Петрушов. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 360 с.
3. Тарасов В. П. Теория и технология доменной плавки / В. П. Тарасов, П. В. Тарасов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
4. Кривенко С. В. Принцип синхронного управления частотой вращения окомкователя и влажностью шихты / С. В. Кривенко // Металл и литье Украины. – 2011. – № 8. – С. 25-28.
5. Вегман Е. Ф. Теория и технология агломерации / Е. Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
6. Кривенко С. В. Эффективность спекания подогретой шихты с применением обогащенного кислородом воздуха / С. В. Кривенко, А. А. Томаш, В. П. Русских // Сталь. – 2011. – № 1. – С. 2-7.

Анотація

Кривенко С. В.

Формування зон в шарі, який агломерується

Розроблено методику дослідження зони перезволоження в шарі шляхом його вивантаження зі спікаючої чаші із збереженням її структури. Агломераційну шихту огрудковують з використанням розплаву парафіну замість води. Руйнування гранул в зонах з сухою шихтою над зоною перезволоження утворює зону дрібних фракцій висотою ≈ 6 мм з низькою газопроницкістю. Зона дрібних фракцій збільшує втрати тиску в 1,4 рази і усадку шару на 20-25 мм. Дрібні фракції формують канальний хід газів в зоні перезволоження, закупорюючи канали діаметром менше 0,6 мм. Для підвищення ефективності агломераційного процесу необхідно знижувати негативний вплив на газопроницкість шару руйнування гранул в зоні сушки, інтенсивного нагріву, а також в зоні перезволоження.

Ключові слова

агломерація, огрудкування, газопроницкість, зона перезволоження, усадка шару

Processes of formation of zones in the layer are investigated in this paper. Technique to study the area waterlogged in bed by his discharge from bowl with preservation of its structure is designed. Sinter mix pelletized using melt paraffin instead of water. Destruction of granules in areas with dry blend of waterlogged area forms a band fines height ≈ 6 mm with low gas permeability. Zone fines increases the pressure loss of 1,4 times and the shrinkage layer 20-25 mm. Fines move gas channel formed in waterlogged area, clogging the channels with a diameter less than 0,6 mm. Negative impact on the permeability of destroying granules in the drying zone, the intense heat and waterlogged area, should be reduced to improve the efficiency of the sintering process.

Оформление рукописи для опубликования в журнале "Металл и литьё Украины":

Материалы для публикации необходимо подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер бумаги А4, книжная ориентация, шрифт Arial – размер 10, междустрочный интервал – 1,5. Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Рукопись должна содержать:

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации на русском, украинском и английском языках;
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) экспериментальной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть черными, четкими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуючную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуючную подпись;
- список литературы (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например - [1]).