

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,
к.ф.-м.н. Русанова Н. И.,
к.т.н. Лебедев В. А.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

КОЛЕБАНИЯ СИТОВОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАТА НА ВЫХОДЕ ИЗ БУНКЕРОВ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ В ДОМЕННОМ ПРОЦЕССЕ

Приведены результаты исследования изменения ситового состава скипового агломерата по мере опорожнения шихтовых бункеров. Установлено, что на выходе из бункеров генерируются среднечастотные колебания ситового состава агломерата, амплитуда которых тем больше, чем больше количество включенных в работу бункеров, а период равен времени их опорожнения.

В результате в первый полупериод работы бункеров средний размер куса ниже средней крупности агломерата в бункерах, а во второй — выше. Колебания ситового состава агломерата приводят к ухудшению газодинамических условий в верхней части доменной печи. Для компенсации колебаний ситового состава агломерата предложено вести плавку с переменным уровнем засыпи.

Ключевые слова: агломерат, бункера, ситовый состав агломерата, размер кусков агломерата, колебания крупности, газодинамические условия, переменный уровень засыпи.

Во многих исследованиях, проводимых в различных отраслях промышленности, отмечается, что при заполнении бункеров неоднородными по крупности сыпучими материалами их частицы имеют тенденцию к обособлению, т. е. к сегрегации по крупности. Степень развития сегрегации при этом, определяется не только ситовым составом материала, но и конструкцией бункеров и способом их заполнения.

В условиях доменного производства в результате проявления сегрегации агломерата (самого неоднородного по крупности материала доменной плавки) как при загрузке, так и выгрузке бункеров бункерной эстакады ситовый состав материала от одной загружаемой порции к другой может существенно отличаться.

Например, по данным авторов работы [1] в условиях Карагандинского металлургического комбината (ныне АО «АрселорМиттал Темиртау») содержание мелочи (фракции размером менее 5 мм) в агломерате отдельных подач в период проведения исследований изменялось от 2–4 до 18–20 %.

В результате аналогичных исследований на доменной печи № 6 Новолипецкого комбината (НЛМК) также установили, что и

при конвейерной подаче материалов в печь доза материала на конвейере имеет в продольном направлении неоднородный ситовый состав [2]. В головной и хвостовой части дозы отмечается повышенная концентрация мелких фракций. Разница в содержании фракции менее 5 мм по отношению к средней части достигала 13 % абс.

Исследования [1] и [2] проводились на печах одинакового объема, но с принципиально отличающимся оборудованием шихтоподачи и в различных шихтовых условиях доменной плавки. При этом в обоих случаях в начале и в конце (первые и последние подачи, головная и хвостовая часть дозы) порции материалов, равной объему одного или нескольких бункеров, наблюдается повышенный выход мелочи. Другие фракции также распределены неравномерно [2].

Приведенные данные свидетельствуют о развитии сегрегации шихтовых материалов при загрузке их в бункера и при последующем их опорожнении. В результате сегрегации материалов в выходном потоке генерируются среднечастотные колебания их ситового состава с периодом, равным времени полного опорожнения бункера или

группы бункеров. Вместе с тем данные авторов [1] и [2] не позволяют установить закономерности колебаний ситового состава материалов на выходе из бункеров по мере их опорожнения и оценить влияние этих колебаний на ход доменного процесса.

Поэтому на доменной печи объемом 3000 м³ Алчевского металлургического комбината, оборудованной транспортной подачей железорудных материалов в скипы, проведены исследования, целью которых являлось изучение колеблемости ситового состава агломерата на выходе из бункеров и ее влияния на ход доменного процесса.

Программой исследований предусматривались: загрузка агломерата в предварительно практически полностью опорожненные бункера, заполнение одного или двух бункеров перед их включением в работу на 90–95 %, отбор и рассев проб скипового агломерата с периодичностью 20–30 минут.

Масса одной пробы составляла около 200 кг. Рассев проб производился по стандартной методике.

В разное время было проведено четыре исследования: А и Г при выдаче агломерата из двух бункеров и Б и В — из одного. Во время проведения исследований ситовый состав загруженного в бункера агломерата существенно различался и имел обобщенные характеристики (средний размер кусков d_{cp} , среднеквадратичное отклонение размера кусков от среднего CKO и коэффициент вариации размера кусков ν), численные значения которых приведены в таблице 1.

При выдаче агломерата из двух бункеров в период А агломерат имел неоднородный ситовый состав ($\nu=1,01$), а в период Г — повышенную крупность ($d_{cp}=28,3$ мм). В периоды Б и В агломерат был достаточно однородным, но и наиболее мелким.

Анализ полученных данных показал, что по мере опорожнения бункеров наблюдаются значительные колебания ситового состава агломерата.

Таблица 1
Характеристики ситового состава загруженного в бункера агломерата

Период	d_{cp} , мм	CKO , мм	ν
А	16,2	16,1	0,99
Б	13,3	8,3	0,63
В	15,4	9,3	0,61
Г	28,3	21,1	0,75

При этом наиболее сильно изменяется в скиповом агломерате содержание мелких (менее 5 мм) и крупных (более 25 мм) фракций (рис. 1 и 2).

В случае, когда выдача агломерата производилась одновременно из двух бункеров, содержание мелких и крупных фракций в скиповом агломерате тесно коррелировано (коэффициент корреляции для периода А составил 0,88, а для периода Г — 0,92). При работе одного бункера связь между мелкими и крупными фракциями значительно слабее. Однако во всех случаях теснота связи между мелкими и крупными фракциями отрицательная и тем выше, чем крупнее агломерат.

Коэффициент корреляции между содержанием мелких и крупных фракций по всем пробам с содержанием средних фракций — не более 0,24.



Рисунок 1 Изменение содержания в пробах фракции размером менее 5 мм

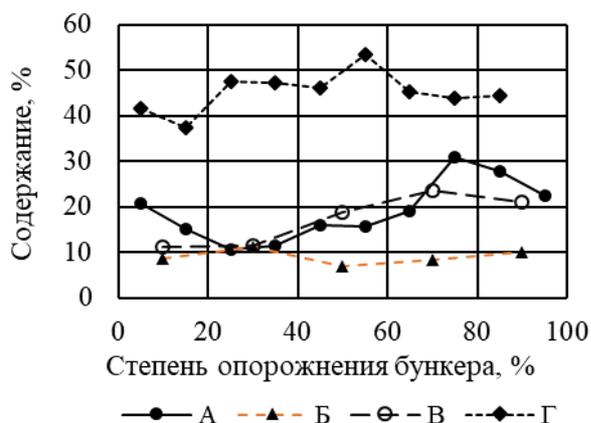


Рисунок 2 Изменение содержания в пробах фракции размером более 25 мм

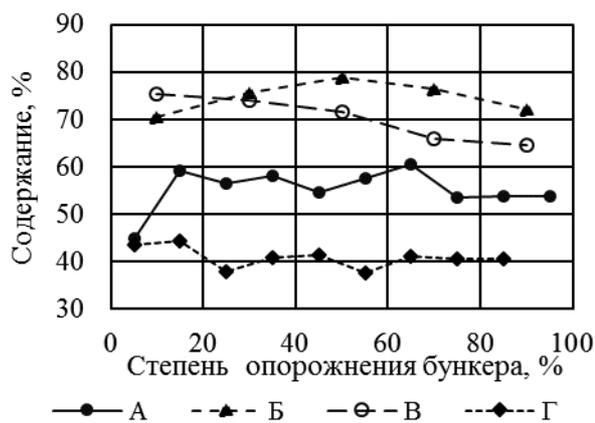


Рисунок 3 Изменение содержания в пробах фракции 10–25 мм

Степень развития сегрегации агломерата по крупности в бункерах и в процессе их опорожнения существенно зависит от ситового состава материала и от количества находящихся в работе бункеров. При этом очевидно, что чем больше бункеров одновременно включено в работу, тем больше амплитуда колебаний отдельных фракций. Так, содержание мелких фракций (менее 5 мм) в период исследования А изменялось в диапазоне от 15,5 мм до 34,2 мм при их содержании в загруженном в бункера агломерате, равном 25,8 %. Коэффициент вариации, характеризующий колеблемость мелких фракций в этот период, равнялся 0,25.

Существенной сегрегации подвержены и крупные фракции (рис. 2). Коэффициент вариации содержания фракции размером более 25 мм отдельных проб составил 0,33, а остальных фракций — не более 0,07 (рис. 3).

В меньшей степени сегрегации подвержен агломерат в периоды Б и В, когда его загрузка производилась из одного бункера. Колеблемость мелких фракций в эти периоды характеризуется коэффициентами вариации, равными 0,16 и 0,17 соответственно, а крупных — в среднем 0,22.

Примерно в такой же степени сегрегировал агломерат в период Г, когда его средняя крупность была максимальной, а состав был достаточно однороден.

Вычисленные в ходе обработки значения обобщенных характеристик ситового состава агломерата d_{cp} и v от одной пробы к другой существенно изменялись.

На рисунке 4 в качестве примера приведены графики изменения обобщенных характеристик ситового состава агломерата по мере опорожнения бункеров для двух периодов исследований А и В, когда выдача агломерата осуществлялась соответственно одновременно из двух и только из одного бункера.

Как следует из приведенных данных, изменение обобщенных характеристик ситового состава скипового агломерата по мере опорожнения бункеров тем существеннее, чем больше бункеров одновременно находится в работе. Последнее подтверждается и данными дисперсионного анализа. Если при работе одного бункера среднее квадратичное отклонение (СКО) средней крупности агломерата в подаче от d_{cp} агломерата партии составляло 0,5–1,5, то при работе двух бункеров оно возросло до 2,5–3,0. Средняя крупность агломерата партии также оказывает существенное влияние на величину колебаний крупности агломерата: чем крупнее агломерат, тем больше СКО среднего размера кусков.

Наряду с изменением крупности агломерата по мере опорожнения бункеров наблюдается и изменение его однородности.

При этом с увеличением крупности агломерата он становится более однородным по крупности. Однако при этом коэффициент вариации размера кусков изменяется в небольшом диапазоне и характеризуется СКО, равным 0,1.

Зависимость изменения среднего размера кусков агломерата по мере опорожнения бункеров в первом приближении описывается уравнением вида

$$d_i = d_{cp} + k \cdot n \cdot v \cdot \sin(-2\pi \cdot \frac{t}{T}), \quad (1)$$

где d_i — средний размер куска скипового агломерата на момент его загрузки от начала включения бункеров в работу t , мм; d_{cp} — средний размер куска агломерата партии, мм; n — количество работающих бункеров; v — коэффициент вариации размера кусков агломерата партии; T — полное время опорожнения бункеров; k — коэффициент масштаба. Коэффициент корреляции между средними размерами кусков агломерата, вычисленными по экспериментальным данным и по формуле (1), равен 0,86.

Процесс истечения материалов из бункеров является сложным и малоизученным. Общая схема истечения материалов из бункеров по существующим представлениям приведена Коротичем В. И. в работе [3].



Рисунок 4 Изменение среднего размера кусков агломерата d и коэффициента вариации их размера v в периоды А и В

С учетом этих представлений изменение ситового состава агломерата и его обобщенных характеристик, очевидно, вызвано следующим.

При заполнении бункеров первые порции материала попадают непосредственно к выпускному отверстию и из-за малых поперечных размеров бункера в нижней его части и в прилегающих к горловине объемах сегрегация агломерата ограничена. Затем, по мере заполнения бункера, развивается сегрегация агломерата по откосам, направленным к стенкам бункера. В результате над выпускным отверстием бункера концентрируется мелкий агломерат, а у стен — крупный. При опорожнении бункера вначале выходит агломерат, не подвергнувшийся сегрегации, и его ситовый состав близок к среднему составу партии. Последующие порции агломерата обеднены крупными фракциями, так как начинается выход материала из эллипсоида, вытянутого вдоль вертикальной оси бункера. После опорожнения бункера на 30–40 % на поверхности материала образуется воронка, крупные куски начинают скатываться от стен к центру, и их содержание в скиповом агломерате возрастает. Когда же бункер становится почти пустым, у стен его остается в основном мелочь, которая и выходит в последнюю очередь.

В целом результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии существенных колебаний ситового состава скипового агломерата, которые сказываются на газодинамических условиях в верхней части доменной печи. Так, например, анализ режимных показателей доменной плавки в период А показал, что изменение перепада давления «середина печи — колошник» ($\Delta P_{верх}$) взаимосвязано с обобщенными характеристиками ситового состава агломерата: чем крупнее и однороднее агломерат, тем меньше $\Delta P_{верх}$. Теснота связи $\Delta P_{верх}$ с величиной $1/d_{cp}$ в этот период характеризовалась парным коэффициентом корреляции, равным 0,693, а с величиной v — 0,748. Полученные данные

хорошо согласуются с общими закономерностями влияния ситового состава железорудных материалов на газодинамическое сопротивление слоя, приведенными в работе [4].

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при опорожнении бункеров в выходном потоке агломерата генерируются значительные колебания ситового состава агломерата, которые приводят к изменению газодинамических условий в верхней части доменной печи.

Вместе с тем заслуживает внимания тот факт, что в первый полупериод работы бункеров (протяженностью $0,5 \cdot T$ — от момента их включения в работу до опорожнения наполовину) средняя крупность скипового агломерата на 5–10 % ниже, а во второй — настолько же выше, чем средняя крупность агломерата, загруженного в бункер (табл. 2).

Таблица 2

Ситовый состав скипового агломерата и его обобщенные характеристики

$\frac{T}{2}$	Фракция, мм	Содержание, %			
		А	Б	В	Г
Первый	<3	15,1	7,0	4,0	7,6
	3–5	15,5	9,2	8,7	6,7
	5–10	30,3	31,8	30,5	12,3
	10–25	24,5	43,2	43,2	29,3
	>25	14,6	8,8	13,6	44,4
	d_{cp}	14,1	12,5	13,9	27,5
	ν	1,10	0,62	0,57	0,80
Второй	<3	10,4	6,4	4,1	6,2
	3–5	10,6	9,2	7,5	6,3
	5–10	27,8	32,5	26,9	12,7
	10–25	28,0	43,3	40,3	27,2
	>25	23,2	8,5	21,2	47,6
	d_{cp}	18,2	12,5	15,7	28,9
	ν	0,90	0,60	0,61	0,88

Во время проведения исследований лишь в период Б средняя крупность агломерата по полупериодам оказалась одинаковой. Очевидно, это вызвано тем, что перед проведением исследований бункер не был полностью опорожнен. Одновременно с изменением средней крупности во втором полупериоде работы бункеров ситовый состав агломерата характеризуется, как правило, более низким коэффициентом вариации размера кусков.

Учитывая установленные в работе [5] закономерности распределения неоднородного сыпучего материала по откосу, следует ожидать, что наблюдаемые особенности формирования ситового состава скипового агломерата будут вызывать и перераспределение газового потока по радиусу печи. Согласно проведенному анализу установлено, что при загрузке материала с уменьшенной крупностью его сегрегация к оси печи уменьшается, а к кладке увеличивается. В результате такого изменения сегрегации кусков агломерата периферийный поток газов усиливается, а центральный — ослабевает. При загрузке в печь материала повышенной крупности, наоборот, сегрегация увеличивается к оси печи, а к кладке — уменьшается, и периферийный поток ослабевает, а центральный усиливается.

Такое влияние ситового состава скипового агломерата на сегрегацию его по радиусу колошника и распределение газового потока в печи может быть скомпенсировано изменением условий формирования поверхности засыпи на колошнике. Поэтому для стабилизации распределения газового потока по радиусу доменной печи плавку предложено вести с переменным уровнем засыпи.

Опыт работы доменных печей с переменным уровнем засыпи показывает, что циклическое его изменение приводит к «дрейфу» местоположения гребней материалов, и их мелкие фракции рассредоточиваются по радиусу и окружности колошника. В результате более равномерно-

го распределения мелочи повышается степень использования газа, что приводит к снижению расхода кокса. Однако это справедливо только тогда, когда есть соответствие между ситовым составом материалов и условиями работы печи.

В соответствии с описанными выше закономерностями колебаний ситового состава агломерата на выходе из бункеров работа на печи должна быть организована следующим образом.

Перед переходом на работу с переменным уровнем засыпи планируемые к включению в работу бункера заполняются агломератом на 90–95 %.

В первый полупериод работы бункеров (примерно до их опорожнения наполовину) целесообразно уровень засыпи увеличивать на 0,25–0,50 м, а во второй — на столько же уменьшать его от основного уровня засыпи, на котором печь обычно работает. Величина изменения уровня засыпи устанавливается в зависимости от количества бункеров, из которых производится выдача агломерата: чем их больше, тем величина изменения уровня засыпи больше. При переходе на новую группу бункеров изменение уровня засыпи повторяется в той же последовательности.

Для оценки предложенной технологии ведения доменной плавки на доменной печи объемом 3000 м³ АМК была проведена десятидневная опытная плавка с переменным уровнем засыпи шихтовых материалов на колошнике. Во время проведения опытной плавки выдача агломерата производилась из четырех бункеров одной стороны шихтоподачи. Емкость бункеров обеспечивала загрузку 20 подач. Первые 8 подач загружались в печь при уровне засыпи 1,75 м, а последующие 12 — при уровне засыпи 1,25 м. Такая организация загрузки являлась оптимальной в условиях работы печи.

Во время опытной плавки каких-либо отклонений от нормального хода процесса не наблюдалось. Напротив, как показывает анализ, во время опытной плавки с пере-

менным уровнем засыпи существенно возросла интенсивность плавки, и приведенная к базовому периоду производительность в опытный период возросла на 1,7 %, а удельный расход кокса снизился более чем на 0,7 %.

Это явилось следствием улучшения радиального распределения газового потока (рис. 5) и увеличения степени использования CO на 0,5 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при прохождении агломерата через бункера в выходном потоке генерируются значительные колебания его ситового состава. При этом в первый полупериод опорожнения одного или группы бункеров, предварительно заполненных на 90–95 %, средняя крупность агломерата на 5–10 % ниже, а во второй — на столько же выше средней крупности агломерата в партии. Такие колебания оказывают влияние на ход доменного процесса.

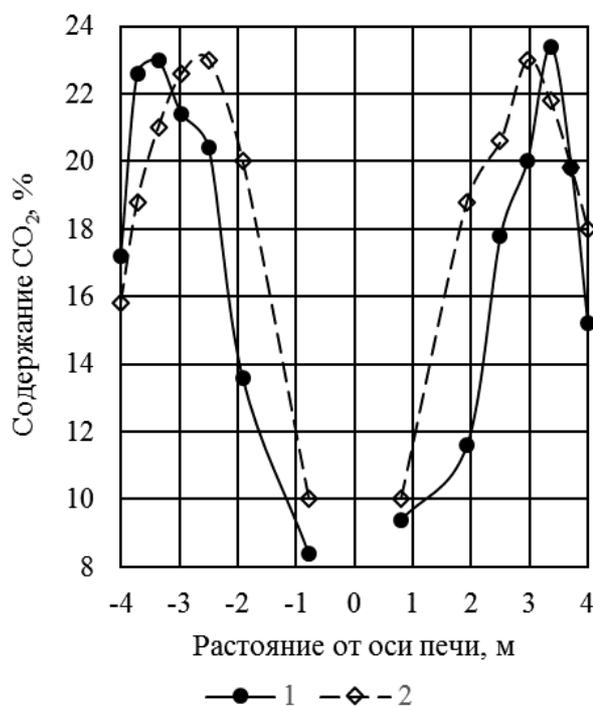


Рисунок 5 Распределение содержания CO₂ в колошниковом газе по радиусу печи в базовом (1) и в опытном (2) периодах

Для улучшения распределения материалов и газов по радиусу доменной печи при наличии колебаний ситового состава загружаемого в печь агломерата уровень засыпи следует менять в соответствии с высотой бункеров; например, в первый полупериод опорожнения бункеров уровень засыпи понижать на 0,25–0,50 м, а во второй — на столько же

увеличивать относительно номинальных его значений.

При этом производительность печи возрастает на 1,5–2,0 %, а удельный расход кокса снижается более чем на 0,7 %.

В дальнейшем планируется провести дополнительные исследования для разработки алгоритмов учета колеблемости ситового состава скипового агломерата.

Библиографический список

1. Пути интенсификации хода доменных печей КарМК большого объема при их работе с высоким выходом шлака [Текст] / Г. Л. Цымбал, В. А. Мирко, В. В. Емушинцев и др. // *Сталь*. — 1980. — № 6. — С. 459–465.
2. Неравномерность гранулометрического состава дозы материала на конвейере доменной печи: совершенствование технологии доменного производства [Текст] / А. М. Гавриков, Э. А. Шепетовский, Н. Г. Иванча, Е. А. Клоцман // *Тематический сборник научных трудов*. — М.: *Металлургия*, 1988. — С. 35–38.
3. Коротич, В. И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] / В. И. Коротич. — М.: *Металлургия*, 1978. — 208 с.
4. Русанов, И. Ф. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Алчевск: *ДонГТУ*, 2016. — № 47. — С. 69–73.
5. Русанов, И. Ф. Влияние условий формирования откоса на сегрегацию материалов по крупности на его поверхности [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Алчевск: *ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»*, 2019. — № 56. — С. 27–33.

© Русанов И. Ф.

© Русанова Н. И.

© Лебедев В. А.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., к.т.н., помощником начальника СПЦ филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» по технологии Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 27.05.2022.

PhD in Engineering Rusanov I. F., PhD in Physics and Mathematics Rusanova N. I., PhD in Engineering Lebedev V. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR, rusanova-2011@inbox.ru)

FLUCTUATIONS IN THE SIEVE COMPOSITION OF SINTER ON EXIT FROM THE BUNKERS AND THEIR COMPENSATION IN THE BLAST FURNACE PROCESS

There have been given the results of the study of changes in the sieve composition of skip sinter as the charge bunkers are emptied. It is determined that on exit from the bunkers, the medium-frequency fluctuations of the sieve composition of sinter are generated, the amplitude of which is greater than the greater number of bunkers included in the operation, and the period is equal to the time of their emptying.

As a result, in the first half-life of bunkers, the average size of piece is lower than the average size of sinter in the bunkers, and in the second — higher. Fluctuations in the sieve composition of sinter lead to deterioration of gas dynamic conditions in the upper part of the blast furnace. To compensate the fluctuations in the sieve composition of sinter, it is proposed to conduct melting with a variable level of stock.

Key words: *sinter, bunkers, sieve composition of sinter, size of sinter pieces, fluctuations in size, gas dynamic conditions, variable level of stock.*