

УДК 669.046.44

САВЕЛЬЕВ Сергей Геннадиевич, доцент, кандидат технических наук

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ТЕПЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Криворожский национальный университет

Выполнен анализ теплотехнических характеристик процесса агломерации рудного сырья. Представлены результаты разработки новых тепловых показателей агломерационного процесса, которые определяют интенсивность его протекания и оказывают влияние на качество готового продукта.

Ключевые слова: процесс агломерации, тепловые показатели, интенсивность, теплотехнические характеристики, углерод

Введение. С теплотехнических позиций агломерация рудного сырья методом просасывания воздуха через спекаемый слой шихты является весьма эффективным технологическим процессом, поскольку при сравнительно незначительной массовой доле горючего углерода в спекаемой шихте – всего 3-5 % при производстве железорудного агломерата и 5-6 % при производстве марганцевого агломерата – обеспечивается достижение в зоне спекания температуры в пределах 1250-1500 °С. Основные причины получения такого результата заключаются, во-первых, в зональном характере горения топлива, обеспечивающем концентрацию теплоты в сравнительно узкой зоне спекаемого слоя, во-вторых, в высокой степени регенерации теплоты агломерационного спека и агломерационного газа, отходящего из зоны горения. [1, с. 118,119]. Несмотря на важнейшее значение теплотехнических явлений в агломерационном процессе, до настоящего времени не сформировалось четкое представление о теплотехнических характеристиках данного процесса. Такое положение сдерживает развитие теории агломерации и не позволяет в полной мере использовать теплотехнические характеристики агломерационного процесса для совершенствования его технологии и улучшения качества готового продукта.

Цель и задачи. Целью настоящей работы является развитие представлений о тепловых показателях агломерационного процесса. Задача состоит в обобщении и анализе известных тепловых показателей процесса агломерации, а также разработке и изучении новых показателей.

Основная часть исследований. Исходя из понятия теплотехники как общетехнической дисциплины, изучающей методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, с одной стороны, и сущности агломерационного процесса методом просасывания воздуха

через спекаемый слой шихты, с другой стороны, к теплотехническим характеристикам процесса агломерации следует, в первую очередь, отнести параметры, которые непосредственно определяют температурно-тепловое состояние процесса, обеспечивающее получение прочного спека. Поскольку основным источником теплоты в процессе агломерации является топливо агломерационной шихты, то базовой теплотехнической характеристикой данного процесса следует считать удельный расход твердого топлива (углерода) на производство агломерата. При этом необходимо отметить, что удельный расход топлива зависит от характеристик спекаемой шихты и условий горения топлива, а последние, в свою очередь, проявляются через стехиометрический коэффициент $n_{ст}$ реакции горения углерода, равный отношению CO_2 к CO в продуктах горения [2, с. 131].

Анализ базовой теплотехнической характеристики процесса агломерации в реальных промышленных условиях работы отечественных агломерационных фабрик показывает, что величина удельного расхода горючего углерода на производство железорудного агломерата (Y) отличается довольно значительно и составляет от 33,7 до 60,1 кг/т агломерата. При этом содержание горючего углерода в шихте составляет соответственно 2,7 и 4,9 %.

Несмотря на представительность базовой теплотехнической характеристики процесса агломерации, она позволяет лишь косвенно оценивать расход теплоты на производство агломерата. Для непосредственной оценки тепловой потребности процесса агломерации теплотехнические характеристики должны содержать единицу измерения количества теплоты. Отсюда следует, что обобщенной теплотехнической характеристикой процесса агломерации может быть удельный расход теплоты на производство агломерата q_m , Дж/кг. Эту величину легко рассчитать, зная массовую долю горючего углерода

в шихте $C_{ш}$, удельную теплоту сгорания углерода в агломерационной шихте c_m , Дж/кг, а также выход годного агломерата из шихты k , по формуле:

$$q_m = C_{ш} \cdot c_m \cdot k . \quad (1)$$

Определение необходимого содержания горючего углерода в шихте обычно выполняют путем расчета теплового баланса процесса агломерации.

Для определения удельной теплоты сгорания углерода в агломерационной шихте можно воспользоваться формулой:

$$c_m = \frac{c_{CO_2} + n \cdot c_{CO}}{1+n} , \quad (2)$$

где C_{CO_2} , C_{CO} – тепловые эффекты горения углерода до CO_2 и CO соответственно, Дж/кг; n – отношение CO/CO_2 в продуктах горения углерода.

Величина отношения CO/CO_2 в продуктах горения углерода зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются содержание углерода в шихте, крупность частиц топлива, скорость газового потока в слое, влажность воздуха, подаваемого в слой. Для типичных условий спекания железорудных шихт влияние первых двух факторов на отношение CO/CO_2 в продуктах горения твердого топлива выражается зависимостью [3]:

$$n = 0,393 + C_{ш} (0,148 - 0,031 d_m) , \quad (3)$$

где $C_{ш}$ – массовая доля горючего углерода в агломерационной шихте; d_m – размер частиц топлива, мм.

Расчет удельной теплоты сгорания углерода в агломерационной шихте отечественных железорудных агломерационных фабрик с использованием приведенных формул показывает, что эта величина в подавляющем большинстве случаев находится в пределах 22-23 МДж/кг углерода. Этому значению удельной теплоты сгорания углерода в агломерационной шихте соответствует отношение CO/CO_2 в продуктах сгорания, равное 1,02-0,87. Полученные результаты близки к приводимым в работе [1, с. 91,92], что подтверждает известные расчетные и экспериментальные данные о незначительном различии между содержанием CO и CO_2 в продуктах сгорания топлива железорудной агломерационной шихты.

Следует отметить, что отношение CO и CO_2 в продуктах сгорания топлива агломерационной шихты также является теплотехнической харак-

теристикой процесса спекания, поскольку оно показывает эффективность использования тепловой энергии топлива. Чем меньше эта величина, тем больше выделяется теплоты при горении, тем полнее используется энергия топлива в процессе агломерации.

Расчет удельного расхода теплоты, выделяемой при сгорании твердого топлива агломерационной шихты, на производство агломерата по формуле (1) показал, что его значение на промышленных агломерационных фабриках изменяется от 0,65 до 1,07 МДж/кг агломерата и определяется, в первую очередь, удельным расходом горючего углерода на производство агломерата (указанные значения q_m соответствуют вышеприведенным величинам U).

Для оценки интенсивности агломерационного процесса с топливо-энергетической позиции ранее [4] были предложены два теплотехнических показателя:

- интенсивность горения содержащегося в шихте твердого топлива I_T (или углерода, если в составе агломерационной шихты имеются другие компоненты, содержащие горючий углерод, I_y), кг/(м²·с), которая равна произведению удельной производительности агломерационного процесса по годному агломерату q , кг/(м²·с) на удельный расход твердого топлива (или углерода соответственно) на производство агломерата T , кг/кг;

- тепловой показатель интенсивности спекания G , Дж/(м²·с), который равен произведению интенсивности горения твердого топлива на удельную теплоту его сгорания c_m , Дж/кг; этот показатель следует назвать интенсивностью выделения теплоты в зоне горения – зоне формирования агломерата.

Исследования влияния различных показателей интенсивности спекания, в том числе интенсивности горения углерода шихты, на прочность спека, которые оценивали по выходу годного агломерата из спека, и готового агломерата – по ГОСТ 15137-77 (барабанная прочность) показали [5], что при существующих условиях производства железорудного агломерата повышение интенсивности спекания сопровождается увеличением выхода годного агломерата из спека, но вызывает ухудшение показателей механической прочности получаемого агломерата. Наиболее тесная связь между исследованными показателями интенсивности спекания (удельной производительностью по годному агломерату, приведенной удельной производительностью, вертикальной скоростью спекания, а также интенсивностью горения углерода шихты) и прочностью

продуктов агломерации установлена для интенсивности горения углерода шихты, которая в значительной мере характеризует температурно-тепловой режим процесса спекания.

Противоречивый характер влияния интенсивности спекания на прочность продуктов агломерационного производства (спека и готового агломерата) объясняется следующим образом [5]. При обработке спека, покидающего агломерационную машину, разрушающие нагрузки не обеспечивают надлежащей оценки его прочности, поэтому выход годного агломерата из спека определяется факторами, оказывающими положительное влияние на прочность спека и усиливающимися с возрастанием интенсивности спекания. Главный из этих факторов – повышение температуры в зоне спекания – зоне формирования агломерата. При обработке годного агломерата, полученного в ходе отделения от спека ранее образовавшейся мелочи, значительные разрушающие нагрузки во вращающемся барабане позволяют более объективно оценить прочностные характеристики агломерата, которые ухудшаются при повышении интенсивности спекания. Это происходит вследствие снижения длительности пребывания материала в зоне формирования агломерата, а также увеличения скорости охлаждения спека, что способствует возрастанию количества непрочных стекловидных фаз в его структуре.

Если интенсивность горения углерода выразить через вертикальную скорость спекания, определяемую по удельному выходу агломерационного газа, то расчетная формула такой характеристики (I_y , кг/м²·с) будет иметь вид:

$$I_y = w_0 \cdot \frac{C_w}{V_z}, \quad (4)$$

где w_0 – скорость фильтрации газа в спекаемом слое, м/с; V_z – удельный выход агломерационного газа, м³/кг сухой шихты.

Интенсивность горения углерода можно выразить при помощи удельной производительности агломерационной машины по годному агломерату q_z , кг/(м²·с). Тогда расчетную формулу для I_y можно записать как:

$$I_y = q_z \cdot \frac{C_w}{k_z}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) позволяют сделать важный теоретический и практический вывод о том, что при нормальном и повышенном расходе топлива, вводимого в шихту, удельная производительность агломерационной машины и вертикальная скорость спекания не только прямо про-

порциональны интенсивности горения топлива, но и обратно пропорциональны массовой доле твердого топлива в шихте. Иными словами, совершенствование агломерационного производства, направленное на снижение расхода топлива, подаваемого в агломерационную шихту, сопровождается повышением производительности агломерационной машины.

Расчеты по приведенным формулам показали, что в условиях отечественных агломерационных фабрик значения интенсивности горения I_y и интенсивности тепловыделения G , изменяются в пределах 30,7-80,2 кг/(м²·ч) и 570,6-1789,3 МДж/(м²·ч) соответственно.

Для оценки эффективности использования теплоты в агломерационном процессе и его теплового режима целесообразно ввести еще одну теплотехническую характеристику – топливную тепловую напряженность зоны горения – зоны формирования агломерата Q , Дж/(м³·с), которая определяет количество теплоты, которая выделяется в результате горения топлива в единице объема данной зоны в единицу времени. Эту теплотехническую характеристику получают, разделяв интенсивность выделения теплоты G на высоту зоны горения, $h_{z,z}$, м.

Высота зоны горения в спекаемом слое зависит, прежде всего, от его высоты и крупности топлива. Влияние указанных факторов учтено в формуле, разработанной для типичных условий спекания:

$$h_{z,z} = 10,2 \ln H - 0,5 d_m^2 + 7,9 d_m, \quad (6)$$

где H – высота спекаемого слоя, мм.

Для типичных условий спекания промышленных железорудных шихт средняя высота зоны горения согласно приведенной формуле составляет 15-21 мм. Отсюда следует, что топливная тепловая напряженность зоны горения – зоны формирования агломерата – может находиться в пределах 7,55-33,14 МДж/(м³·с). Столь значительные колебания теплотехнической характеристики важнейшей технологической зоны процесса агломерации, несомненно, оказывают существенное влияние на металлургические свойства готового агломерата и, прежде всего на его механическую прочность и восстановимость.

Расчет и сопоставление колеблемости относительно средней величины значений интенсивности горения топлива агломерационной шихты, интенсивности выделения теплоты в зоне горения и топливной тепловой напряженности зоны горения, приведенных выше для одних и тех же агломерационных фабрик, показывают, что они

последовательно возрастают в ряду I_y , G , Q и составляют 0,83, 1,16, 1,26 соответственно. Это свидетельствует о том, что по мере усиления конкретизации тепловых условий протекания процесса агломерации колебания соответствующих характеристик процесса возрастают.

Выводы. Выполненные исследования показывают, что тепловые показатели агломерационного процесса можно разделить на две основные группы:

– параметры, которые характеризуют завершённый процесс спекания и отнесенные к единице готового продукта (агломерата);

– параметры, представляющие динамику протекания агломерационного процесса и отне-

сенные к единице площади спекания или единице объема зоны формирования агломерата.

К первой группе относятся удельные расходы топлива (углерода) и теплоты на производство агломерата. Вторая группа представлена интенсивностью горения топлива (углерода) агломерационной шихты и выделения теплоты в зоне горения, а также топливной тепловой напряженностью данной зоны. Показатели второй группы, в отличие от первой, более представительны характеризуют технологические особенности агломерационного процесса, которые определяют качество готового агломерата и производительность агломерационной машины.

Бібліографічний список

1. **Коротич, В. И.** Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] / В. И. Коротич. – М. : Metallurgiya. – 1978. – 208 с.
2. **Клейн, В. И.** Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса [Текст] / В. И. Клейн, Г. М. Майзель, Ю. Г. Ярошенко, А. А. Авдеенко. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2004. – 224 с.
3. **Малыгин, А. В.** К вопросу о достоверности расчетного теплового баланса агломерации [Текст] / А. В. Малыгин, Е. Г. Дмитриева, С. С. Скачкова // Сталь. – 2006. – № 2. – С. 2-4.
4. **Савельев, С. Г.** Показатели интенсивности агломерационного процесса [Текст] / С. Г. Савельев, В. А. Шаповалов // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг : КТУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 78-82.
5. **Савельев, С. Г.** Зависимость прочности агломерата от интенсивности спекания [Текст] / С. Г. Савельев // Сталь. – 2011 – № 10. – С. 10-12.

САВЕЛЬЄВ Сергій Геннадієвич, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна). E-mail: comher@bk.ru

РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ТЕПЛОВІ ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ

Виконано аналіз теплотехнічних характеристик процесу агломерації рудної сировини. Подано результати розробки нових теплових показників агломераційного процесу, які визначають інтенсивність його протікання та впливають на якість готового продукту.

Ключові слова: процес агломерації, теплові показники, інтенсивність, теплотехнічні характеристики, вуглець

SAVEL'EV Sergiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ferrous Metals and Foundry, Krivorozhskij National University (Krivyj Rih, Ukraine); E-mail: comher@bk.ru

DEVELOPMENT OF REPRESENTATIONS ON THERMAL INDICATORS OF THE AGGLOMERATION PROCESS

The analysis of heat engineering characteristics of the agglomeration process for ore raw materials is performed. The results of development of new thermal parameters of agglomeration process which determine the intensity of its flow and affect the quality of the finished product are presented.

Key words: sinter process, thermal indicators, intensity, thermal and technical characteristics, carbon

Стаття надійшла до редакції 20.10.2017 р.
Рецензент, проф. Г.В. Губін

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>