

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.162.214

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-28-34>

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ОСАЖДЕНИЙ И ПУТИ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Терентьев Д.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): абразивные частицы, выносимые колошниковыми газами через засыпные аппараты доменных печей, попадают на детали и узлы механизмов колошника, скиповых подъемников и других агрегатов, образуя при этом твердые осадения на рабочих поверхностях. В свою очередь, наличие абразивных частиц и твердых осадений на трущихся поверхностях механизмов увеличивает их износ и снижает ресурс агрегатов в целом. Снижение выбросов колошниковой пыли различных фракций и уменьшение твердых осадений является важной и актуальной задачей. **Цель работы:** исследование характера образования твердых осадений и снижение количества абразивных частиц, выносимых колошниковыми газами. **Используемые методы:** для решения поставленной задачи проводили аналитические исследования количества колошниковой пыли, выносимой через неплотности засыпного аппарата, в зависимости от температуры колошниковых газов и объема доменной печи. **Новизна:** установлена зависимость между составляющими фракциями колошниковой пыли, температурой, величиной монтажного зазора, шероховатостью контактных поверхностей конуса и чаши и скоростью частиц колошникового газа. **Результаты:** в работе дана количественная оценка площади впадин между шероховатостями контактных поверхностей, являющимися дополнительными каналами для прохождения колошникового газа. Увеличение площади поперечного сечения зазоров между конусом и чашей при шероховатости $R_z = 10$ мкм по сравнению с идеально гладкими при монтажном зазоре 0,03 мм составляет до 60%. Более крупные фракции пыли (0,63 мм) проходят через зазоры деталей засыпных аппаратов с меньшей скоростью, чем мелкие фракции (0,048 мм). Увеличение монтажного зазора увеличивает скорость истечения колошникового газа. Увеличение шероховатости обработки контактных поверхностей увеличивает общую площадь поперечного сечения контактного зазора между конусом и чашей с одновременным увеличением сопротивления прохождению колошникового газа. Наиболее интенсивно на увеличение скорости частиц колошниковой пыли оказывает влияние температура колошникового газа. При увеличении температуры колошникового газа с 200 до 500°C (в 2,5 раза) скорость частиц колошниковой пыли увеличивается в 1,28 раза. **Практическая значимость:** сокращение выброса абразивных частиц с колошниковым газом и уменьшение твердых осадений позволяет увеличить ресурс деталей и узлов механизмов доменных печей за счет снижения их износа.

Ключевые слова: засыпной аппарат; колошниковая пыль; абразивные частицы; монтажный зазор; шероховатость поверхности.

Введение

Засыпные аппараты являются одним из основных элементов доменных печей, обеспечивающих требуемые режимы их работы. Они выполняют две основные функции – загрузку и распределение шихты и обеспечение герметичности колошника. Работая в условиях интенсивного абразивного износа при повышенных температурах, засыпные аппараты должны быть изготовлены из износостойких материалов, особенно это важно для кон-

тактных поверхностей конуса и чаши. Применяемые износостойкие наплавочные материалы имеют различную адгезионную способность к частицам колошниковой пыли и поэтому имеют различную склонность к образованию на их поверхностях твердых осадений.

Наличие твердых осадений на поверхностях засыпных аппаратов резко ухудшает их герметичность, что способствует повышению интенсивности износа контактных поверхностей конуса и чаши и образованию продувов. В свою очередь, образование продувов приводит

© Терентьев Д.В., 2017

к увеличению выбросов абразивных частиц с колошниковыми газами, повышению износа деталей и узлов механизмов засыпного аппарата и скиповых подъемников, преждевременной замене конуса и чаши, увеличению тем самым простоев доменных печей и снижению их производительности.

Материалы и методы исследования

Обзор имеющихся исследований по данной проблеме показывает, что интенсивность проявлений адгезии между твердыми телами зависит от природы материала контактирующих тел, физико-химического сродства между ними, температуры, состояния поверхностей и других факторов [1–4].

В настоящее время отсутствуют данные по природе и закономерностям образования твердых осадений на засыпных аппаратах и не разработаны пути снижения интенсивности их образования. Поэтому исследования структуры и химического состава твердых осадений, исследования характера образования адгезионных связей и прочности сцепления между твердыми осадениями и поверхностями засыпного аппарата, установление зависимости между составом и количеством колошникового газа и интенсивностью образования твердых осадений, несомненно, будут способствовать разработке мероприятий по их устранению на поверхностях механизмов засыпного аппарата и скиповых подъемников и повышению срока их службы.

Зависимость между размером частиц колошниковой пыли и периодом эксплуатации засыпного аппарата доменной печи объемом 1370 м³ приведена в **таблице**.

Анализ и рассев колошниковой пыли доменной печи объемом 1370 м³, %

| Фракция, мм | Период эксплуатации засыпного аппарата доменной печи | | |
|-------------|--|-------------------------|------------------|
| | После ввода в эксплуатацию | В середине срока службы | Перед демонтажем |
| > 0,63 | 0,23 | 0,94 | 2,93 |
| 0,63–0,4 | 4,37 | 6,59 | 10,50 |
| 0,4–0,2 | 16,47 | 20,95 | 22,93 |
| 0,2–0,14 | 10,29 | 8,72 | 10,73 |
| 0,14–0,063 | 37,70 | 39,00 | 35,00 |
| 0,063–0 | 30,94 | 23,75 | 17,91 |

Анализ таблицы свидетельствует, что по мере эксплуатации засыпного аппарата при общем увеличении колошниковой пыли, проходящей через его неплотности, доля крупных частиц возрастает (до 12,7 раз), а доля мелкой фракции уменьшается (до 1,7 раза). Увеличение доли

крупных частиц колошниковой пыли, проходящих через зазоры в уплотнениях элементов привода механизмов засыпного аппарата и скиповых подъемников и попадающих на рабочие поверхности деталей и узлов, интенсифицируют их абразивный износ. К таким деталям и узлам, в частности, относятся зубчатые зацепления и подшипниковые узлы редукторов привода скиповых лебедок.

Количество колошникового газа (Q_1), проходящего через неплотности засыпного аппарата в единицу времени, равно

$$Q_1 = F_0 \cdot v_1, \quad (1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения зазора между конусом и чашей; v_1 – скорость прохождения газа в зазорах засыпного аппарата.

Количество колошниковой пыли (Q_2), выносимой через неплотность засыпного аппарата в единицу времени, составляет [3, 4]

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{v_{2i}}{v_1} \cdot \alpha_0 \cdot \beta_1, \quad (2)$$

или с учетом (1)

$$Q_2 = F_0 \cdot v_2 \cdot \alpha_0 \cdot \beta_1, \quad (3)$$

где v_2 – скорость частиц колошниковой пыли в зазорах засыпного аппарата; α_0 – концентрация пыли в колошниковом газе; β_1 – коэффициент, учитывающий долю частиц колошниковой пыли, способной проникнуть через зазоры засыпного аппарата.

В поднятом положении устойчивость конуса обеспечивается в том случае, если контактные поверхности конуса и чаши соприкасаются не менее чем в трех точках, что схематично показано на **рис. 1**.

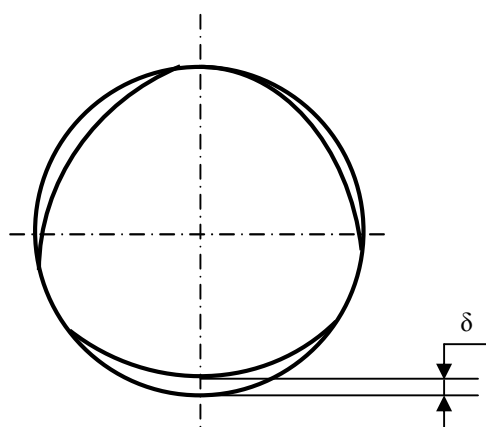


Рис. 1. Схема неплотности контактных поверхностей конуса и чаши по окружности без учета шероховатости

Легко показать, что независимо от количества мест соприкосновения суммарная площадь поперечных сечений зазоров между конусом и чашей без учета шероховатостей поверхностей равна

$$F = \frac{1}{2} \pi D \delta, \quad (4)$$

где δ – монтажный зазор между контактными поверхностями конуса и чаши.

Поскольку контактные поверхности конуса и чаши не являются абсолютно гладкими, то дополнительные неплотности в контакте за счет шероховатостей поверхностей учтем следующим образом.

Представим фрагмент зазора между контактными поверхностями схемой, показанной на **рис. 2**.

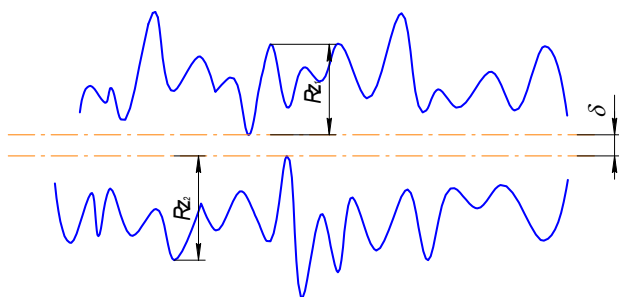


Рис. 2. Схема зазора неплотностей деталей засыпного аппарата с учетом шероховатости контактных поверхностей

Площади впадин между шероховатостями составляют дополнительные каналы для прохождения колошниковой пыли и в первом приближении определяются зависимостью

$$F = \left[R_{z_1} \cdot (1 - t_{p_1}) + R_{z_2} (1 - t_{p_2}) \right] \cdot \frac{1}{2} \pi D, \quad (5)$$

где R_{z_1} и R_{z_2} – соответственно высота шероховатостей конуса и чаши по шкале R_z ; t_{p_1} и t_{p_2} – среднеинтегральные значения опорных поверхностей шероховатых слоев конуса и чаши.

Суммарная площадь поперечного сечения зазора между конусом и чашей равна

$$F = \frac{\pi}{2} \left[\delta + R_{z_1} \cdot (1 - t_{p_1}) + R_{z_2} (1 - t_{p_2}) \right] D. \quad (6)$$

Монтажный зазор для засыпных аппаратов доменных печей в среднем составляет 0,03 мм. Шероховатость шлифованных контактных поясов чаши и конуса равна $R_{z_1} = R_{z_2} \approx 10$ мкм.

Среднеинтегральная величина опорной кривой шероховатостью слоя шлифованных контактных поверхностей $t_{p_1} = t_{p_2} \approx 0,36$.

Для вышеприведенных значений величина эквивалентного зазора составляет 0,048 мм. Следовательно, через зазоры между неизношенными контактными поверхностями конуса и чаши могут проникать частицы колошниковой пыли размером до 0,048 мм. Доля частиц с такими размерами в общем рассеивании колошниковой пыли согласно **таблице** равна 17,78%. По мере эксплуатации засыпных аппаратов доля крупных фракций возрастает.

Скорость частиц колошниковой пыли в зазорах между контактными поверхностями засыпного аппарата определим с учетом следующих допущений:

- закономерность перемещения частиц колошниковой пыли не зависит от их концентрации в колошниковом газе;
- взаимное столкновение частиц отсутствует при их прохождении через зазоры засыпного аппарата;
- влияние веса частиц на закономерность их перемещения не учитываем.

Последнее допущение связано с тем, что вес частицы составляет менее 0,02% от аэродинамической силы.

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение движения частицы колошниковой пыли запишется в виде [5]

$$m \frac{d^2 L}{dt^2} - c f_0 \cdot \rho_1 \frac{(v_1 - v_2)^2}{2} = 0, \quad (7)$$

где m – масса частицы; L – текущая координата по длине контакта конуса с чашей засыпного аппарата по ходу колошниковой пыли; c – коэффициент лобового сопротивления частицы; f_0 – площадь лобового сечения частицы; ρ_1 – плотность колошниковой пыли в зазорах засыпного аппарата; t – время.

Коэффициент лобового сопротивления зависит от числа Рейнольдса (Re) и формы частицы. В соответствии с исследованиями [5] для условий прохождения колошниковой пыли при неплотности засыпного аппарата $Re \geq 10^3$ и коэффициент $c \approx 0,5$.

Решая дифференциальное уравнение, получим

$$v_2 = \frac{A v_1^2 t}{A v_1 \cdot t + 1}, \quad (8)$$

где $A = cf \frac{\rho_1}{2m}$ – коэффициент аэродинамической силы.

Величина ρ_1 увеличивается с ростом давления (P_0) и уменьшается с ростом температуры (T_0). Изменение плотности колошникового газа в расчетах учитывается зависимостью $\rho_1 = P_0/RT_0$. Здесь R – универсальная газовая постоянная, равная 8,3144 Дж/(моль·К).

Из полученной зависимости следует, что скорость частиц колошниковой пыли, выносимых газовым потоком, неодинакова. Частицы с большей массой перемещаются с меньшей скоростью, чем частицы с меньшей массой. Поэтому при одной и той же концентрации колошниковой пыли количество мелких частиц проходит через зазоры в засыпном аппарате в большем количестве за единицу времени при прочих равных условиях.

Скорость частиц колошниковой пыли возрастает с увеличением скорости прохождения колошникового газа через неплотности засыпного аппарата. Соответственно возрастает и количество колошниковой пыли, проходящей через зазоры между контактными поверхностями конуса и чаши в единицу времени [6–10].

Время прохождения колошникового газа через неплотности засыпного аппарата определяется зависимостью

$$t = \frac{L_k}{v_1}, \quad (9)$$

где L_k – длина контакта конуса с чашей по ходу колошникового газа, м.

Подстановкой соотношения (9) в (8) имеем

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{AL_k}{AL_k + 1}. \quad (10)$$

Следует отметить, что скорость истечения колошникового газа зависит от его давления и сопротивления в каналах, образуемых зазорами в засыпных аппаратах. Однако повышение давления колошниковых газов увеличивает скорость его истечения до определенного значения.

Существует критическое давление газов, превышение которого не оказывает влияния на скорость прохождения газов через неплотности засыпного аппарата. Общий перепад давления между кольцевым воздухопроводом и колошником при нормальной работе должен составлять: на доменных печах с объемом до 1500 м³ 1,25–1,50 атм и 1,35–1,60 атм для доменных печей с объемом более 2000 м³ (но не более 2,0 атм) [11–17].

Режим работы доменных печей на критиче-

ском и закритическом давлении позволяет выразить скорость истечения газов в зависимости от температуры по эмпирической зависимости

$$v_1 = 18,3\sqrt{T_0}, \quad (11)$$

где T_0 – абсолютная температура колошникового газа.

Подставляя значения v_1 из соотношения (11) в уравнение (10), получим

$$v_2 = \frac{18,3\sqrt{T_0} \cdot AL_k}{AL_k + 1}. \quad (12)$$

Полученное уравнение показывает, что с увеличением температуры колошникового газа скорость частиц колошниковой пыли возрастает, соответственно возрастает и количество выносимой колошниковой пыли через неплотности засыпного аппарата.

Результаты расчетов по зависимости (12) приведены на рис. 3, 4.

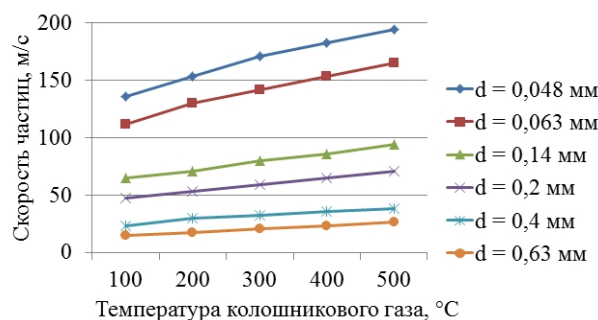


Рис. 3. Зависимость скорости частиц колошниковой пыли доменных печей объемом до 1500 м³ от температуры колошникового газа при различных размерах частиц ($P = 1,5$ атм; $\delta = 0,03$ мм)

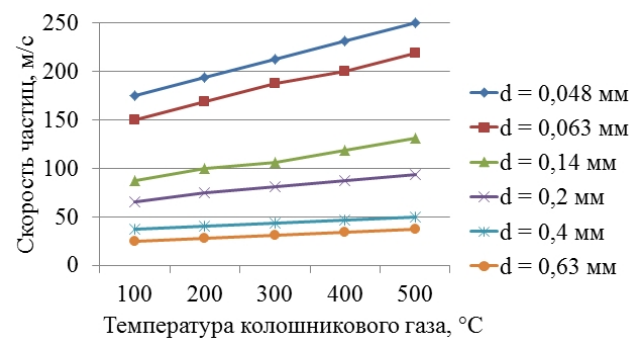


Рис. 4. Зависимость скорости частиц колошниковой пыли доменных печей объемом свыше 2000 м³ от температуры колошникового газа при различных размерах частиц: ($P = 1,5$ атм; $\delta = 0,03$ мм)

Расчеты показывают, что скорость частиц колошниковой пыли увеличивается с ростом температуры колошникового газа и уменьшением их размеров. Аналогичные зависимости иллюстрированы графиками, приведенными на рис. 3 и 4.

Уменьшение размера частицы с 0,63 до 0,063 мм увеличивает скорость колошниковой пыли в 6,24 раза.

При увеличении температуры колошникового газа с 200 до 500°C (в 2,5 раза) скорость частиц колошниковой пыли увеличивается в 1,28 раза.

Приведенные данные получены без учета температурных деформаций чаши засыпного аппарата в процессе его эксплуатации.

Количество осадений на поверхностях засыпных аппаратов пропорционально количеству частиц колошникового газа, проходящего через неплотности чаши и конуса засыпного аппарата, и величине адгезии частиц пыли к материалу контактных поверхностей и определяется зависимостью

$$G = k \cdot Q \cdot \tau, \quad (13)$$

где k – коэффициент пропорциональности; Q – количество колошниковой пыли, проходящей через зазоры засыпного аппарата; τ – адгезия колошниковой пыли к материалу засыпных аппаратов.

Для доменных печей объемом от 1370 до 2000 м³ коэффициент пропорциональности изменяется в пределах $2,2 \cdot 10^{-5}$ – $2,8 \cdot 10^{-5}$ [18–21]. Зависимость количества осадений на поверхностях засыпного аппарата от температуры колошникового газа приведена на рис. 5, 6.

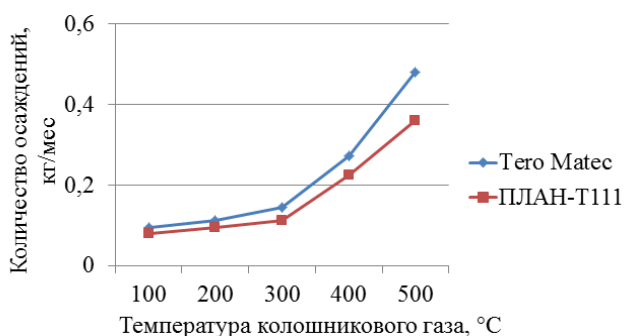


Рис. 5. Зависимость количества осадений от температуры колошникового газа для доменных печей объемом до 1500 м³:
 ◆ – наплавочный материал ПЛАН-Т111;
 ■ – наплавочный материал Tero Matec;
 шероховатость обработки $R_z = 10$ мкм

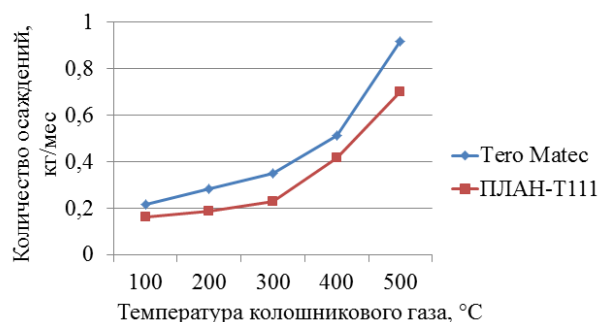


Рис. 6. Зависимость количества осадений от температуры колошникового газа для доменных печей объемом свыше 2000 м³:
 ◆ – наплавочный материал ПЛАН-Т111;
 ■ – наплавочный материал Tero Matec;
 шероховатость обработки $R_z = 10$ мкм

Выводы

Проведенные исследования показали, что увеличение монтажного зазора увеличивает скорость истечения колошникового газа, при этом возрастание параметров шероховатости контактных поверхностей увеличивает общую площадь поперечного сечения контактного зазора между конусом и чашей с одновременным увеличением сопротивления прохождению колошникового газа. Наиболее интенсивно на увеличение скорости частиц колошниковой пыли оказывает влияние температура колошникового газа. При росте температуры колошникового газа с 200 до 500°C (в 2,5 раза) скорость частиц колошниковой пыли увеличивается в 1,28 раза. Больше количество осадений на деталях засыпного аппарата доменных печей с объемом 2000 м³ и выше связано с большими размерами конуса и чаши. Таким образом, уменьшение шероховатости поверхности чаши и конуса с $R_z = 10$ до $R_z = 2,5$ мкм снижает интенсивность образования осадений в 1,19–1,22 раза.

Предлагаемые рекомендации позволяют снизить выбросы колошниковой пыли, уменьшить количество абразивных частиц и твердых осадений на узлах и механизмах агрегатов доменных печей и повысить тем самым их ресурс за счет снижения износа деталей.

Список литературы

1. Сибатуллин С.К. Оптимальная степень прямого восстановления железа из оксидов // Сталь. 1997. № 4. С. 1–5.
2. Yu.S. Yusfin, P.I. Chernousov and A.Ya. Travyanov. Determination of the minimum possible coke consumption for blast-furnace smelting. Metallurgist. Vol. 42, №4, 1998.
3. Верман Е.Ф. и др. Металлургия чугуна / под ред. Юсфина Ю.С. М.: Академкнига, 2004. 774 с.

4. Щедрин В.М. Теория доменной плавки под давлением. М.: Металлургия. 1962. 454 с.
5. Идальчик М.М. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Госэнергоиздат, 1960.
6. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 257 с.
7. Сравнение свойств стабилизированного агломерата ОАО «ММК» и окатышей ССГПО / Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В., Чевычелов А.В., Гостенин В.А., Сенькин К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3(27). С. 23–25.
8. Стефанович М.А., Сибгатуллин С.К., Гуцин Д.Н. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи: монография / под ред. С.К. Сибгатуллина. Магнитогорск: Изд-во магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 161 с.
9. Сибгатуллин С.К. Формирование слоя шихты в колошниковом пространстве доменной печи: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 188 с.
10. Sibgatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk, V.A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation. Metallurgist. 2014. T. 58. P. 285–293.
11. Chevychelov A.V., Pavlov A.V., Teplykh E.O., Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K. Charging coke nuts in the batch bunker. Steel in Translation. 2013. T. 43. №7. P. 434–435.
12. Об организации доменного процесса изменением режима работы вращающегося распределителя шихты / Стефанович М.А., Моне-тов Г.В., Сысоев Н.П., Волкова Н.Г., Гуляев Г.М. // Производство чугуна: межвуз. сборник. Вып. 7. Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1981. С. 59–67.
13. Об оптимальности распределения материалов в колошниковом пространстве доменной печи / Сибгатуллин С.К., Махмутов Р.Ф., Сибгатуллина М.И., Стародубов В.А., Буранова Э.Ф. // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 2 (15). С. 31–34.
14. Технологические особенности автоматического регулирования окружного распределения газового потока в доменной печи / Ваганов А.И., Коноплов А.Д., Сибгатуллин С.К., Полинов П.А. // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. Вып. 4. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 10–14.
15. О соотношения углов откоса загружаемых материалов на их распределение в колошниковом пространстве доменной печи / Сибгатуллин С.К., Гуцин Д.Н., Тимофеев В.Ю., Филиппов А.И., Сибгатуллина М.И. // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1. С. 30–35.
16. Борисов А.Ф. Советы начальнику доменного цеха. М.: Прогресс, 1996. 218 с.
17. Сибгатуллин С.К., Терентьев В.Л. Предельная степень использования газа-восстановителя в доменной печи // Сталь. 2000. № 1. С. 11–14.
18. Исследование причин износа кладки и системы охлаждения доменной печи № 4 объемом 2000 м³ ОХМК / Рогов М.В., Гуляев Г.М., Бондарь А.А., Сибгатуллин С.К. // Бюл. НТИ. Чёрная металлургия. 1990. № 2. С. 53–54.
19. Takhautdinov R.S., Terentjev V.L., Sibgatullin S.K., Mavrov A.L., Fadeev A.M., Ivanov R.G., Zakharov S.A. Development of blast furnaces at Magnitogorsk iron and steel works 3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking and 3rd European Rolling Konferenz. Düssekendorf, Germany. 2003. S. 331–333.
20. Совершенствование рабочего пространства доменной печи и противотока в нём на основе теории теплообмена / Дружков В.Г., Сибгатуллин С.К., Суворов М.Н., Прохоров И.Е. // Научные школы УПИ-УГТУ №2. С творческим наследием Б.И. Китаева – в XXI век. Екатеринбург, 1998. С. 95–97.
21. Использование средств организации доменного процесса / Стефанович М.А., Сибгатуллин С.К., Гуляев Г.М., Шкурко Е.Ф., Пишнограев С.Н. // Производство чугуна. Вып. 8. Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1982. С. 99–107.

Поступила 30.01.17.

Принята в печать 20.03.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-28-34>

STUDYING THE AMOUNT OF SOLID DEPOSIT AND THE WAYS TO REDUCE IT IN ORDER TO EXTEND THE LIFE OF BLAST FURNACE COMPONENTS

Dmitry V. Terentyev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ktnterentyev@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7960-180X>

Abstract

Problem Statement (Relevance): Abrasive particles that are carried away with the blast furnace gas through double bell-and-hoppers tend to settle on the parts of the blast furnace throat, skips and other components, forming a solid deposit on the working surfaces. The presence of abrasive particles and a solid deposit on the friction surfaces can lead to an increased wear rate and affect the life of the unit. It appears to be an extremely important problem to try and find the way to reduce the blast furnace dust emission and solid deposit generation. **Objectives:** This article aims to look at the formation of solid deposits and at ways to reduce the amount of abrasive particles carried with the blast furnace gas. **Methods Applied:** To achieve the above objectives studies were conducted that looked at the amount of blast furnace dust carried away through the gaps in double bell-and-hoppers depending

on the temperature of the blast furnace gas and the furnace capacity. **Originality:** A relationship has been established between the distribution size of the blast furnace dust, the temperature, the clearance fit, the roughness of the contact surfaces of the bell and the hopper and the particle speed. **Findings:** The authors of the study estimated the total low area of the contact surfaces which provides an additional escape path for the blast furnace gas. There was a 60% increase found in the cross section of the clearance between the bell and the hopper with the surface roughness $R_z = 10 \mu\text{m}$ versus absolutely smooth surfaces with the clearance fit of 0.03 mm. A coarse dust (0.63 mm) travels through the gaps between the components of the double bell-and-hopper at a lower speed compared with finer particles (0.048 mm). Bigger mounting clearances lead to the blast furnace gas coming out at a higher speed. Rougher contact surfaces have a larger

total cross section of the contact clearance between the bell and the hopper hindering the passage of the blast furnace gas. The temperature of the blast furnace gas has a major impact on the speed of the blast furnace dust. Thus, if the temperature of the blast-furnace gas increases from 200°C to 500°C (2.5 times), a 1.28-point increase in the speed of the blast furnace dust is observed. **Practical Relevance:** The reduction in the abrasive particles emission and the reduction of solid deposits can help extend the service life of the blast furnace mechanisms due to reduced wear.

Keywords: Double bell-and-hopper, blast furnace dust, abrasive particles, clearance fit, surface roughness

References

1. Sibagatullin S.K. The optimum degree of direct reduction of iron oxides. *Stal'* [Steel], 1997, no. 4, pp. 1–5. (In Russ.)
2. Yu.S. Yusfin, P.I. Chemousov and A.Ya. Travyanov. Determination of the minimum possible coke consumption for blast-furnace smelting. *Metallurgist*, vol. 42, no. 4, 1998.
3. Vegman E.F. et al. *Metallurgiya chuguna* [Metallurgy of irons]. Ed. by Yu.S. Yusfin. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.)
4. Shchedrin V.M. *Teoriya domennoy plavki pod davleniem* [The theory of pressure smelting]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 454 p. (In Russ.)
5. Idalchik M.M. *Spravochnik po gidravicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. (In Russ.)
6. Babarykin N.N. *Teoriya i tekhnologiya domennogo protsessa* [Theory and technology of the blast furnace process]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, 257 p. (In Russ.)
7. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V., Chevychelov A.V., Gostenina V.A., Senkin K.V. Comparison of the properties of the MMK JSC stabilized sinter and those of the SSGP pellets. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 3 (27), pp. 23–25.
8. Stefanovich M.A., Sibagatullin S.K., Gushchin D.N. *Zakonemosti dvizheniy shikhty i gaza v domennoy pechi: monografiya* [Blast furnace charge and gas flow patterns: monograph]. Ed. by S.K. Sibagatullin. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 161 p. (In Russ.)
9. Sibagatullin S.K. *Formirovaniye sloya shikhty v kolosnikovom prostanstve domennoy pechi: uchebnoye posobie* [Charge forming in the blast furnace throat: learner's guide]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 188 p. (In Russ.)
10. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, pp. 285–293.
11. Chevychelov A.V., Pavlov A.V., Teplykh E.O., Kharchenko A.S., Sibagatullin S.K. Charging coke nuts in the batch bunker. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 7, pp. 434–435.
12. Stefanovich M.A., Monetov G.V., Sysyov N.P., Volkova N.G., Gulyaev G.M. On managing the blast furnace process by changing the operation mode of the bell-type distributor. *Proizvodstvo chuguna. Mezhvuzovskiy sbornik* [Production of pig iron. Collection of papers]. Sverdlovsk, 1981, vol. 7, pp. 59–67. (In Russ.)
13. Sibagatullin S.K., Makhmutov R.F., Sibagatullina M.I., Starodubov V.A., Buranova E.F. On optimum distribution of raw materials around the blast furnace throat. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of iron and steel production], 2014, no. 2 (15), pp. 31–34. (In Russ.)
14. Vaganov A.I., Konoplev A.D., Sibagatullin S.K., Polinov P.A. Technology behind automatic process control of the gas flow distribution around the blast furnace circumference. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. Mezhtseleynyy sbornik nauchnykh trudov* [Theory and technology of iron and steel production. Collection of papers]. Ed. by V.M. Kolokoltsev, Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University, 2004, vol. 4, pp. 10–14. (In Russ.)
15. Sibagatullin S.K., Gushchin D.N., Timofeev V.Yu., Filippov A.I., Sibagatullina M.I. On the relationship between the angles of charging and the distribution of raw materials around the blast furnace throat. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of iron and steel production], 2015, no. 1, pp. 30–35. (In Russ.)
16. Borisov A.F. *Sovety nachalniku domennogo tsekha* [Some tips for blast furnace supervisor]. Moscow: Progress, 1996. 218 p. (In Russ.)
17. Sibagatullin S.K., Terentyev V.L. Ultimate utilization of the reducing gas in a blast furnace. *Stal'* [Steel]. 2000, no. 1, pp. 11–14. (In Russ.)
18. Rogov M.V., Gulyaev G.M., Bondar' A.A., Sibagatullin S.K. Looking at the factors that caused wear on the lining and the cooling system of Blast Furnace 4 with the capacity of 2000 m³ operated by Orsk-Khalilovsk Iron & Steel Works. *Byulleten' NTI. Khimicheskaya metallurgiya* [Bulletin of scientific and technical information. Ferrous metallurgy], 1990, no. 2, pp. 53–54. (In Russ.)
19. Takhautdinov R.S., Terentyev V.L., Sibagatullin S.K., Mavrov A.L., Fadeev A.M., Ivanov R.G., Zakharov S.A. Development of blast furnaces at Magnitogorsk iron and steel works 3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking and 3rd European Rolling Conference. Dusseldorf, Germany. 2003, pp. 331–333.
20. Druzhkov V.G., Sibagatullin S.K., Suvorov M.N., Prokhorov I.E. Improving the blast furnace and the counter-current on the basis of heat transfer theory. *Nauchnye shkoly UPI-UGTU №2. S tvorcheskimi naslediyami B.I. Kitaeva – v XXI vek* [Scientific schools of Ural Polytechnic Institute-Ural State Technical University No. 2. With the legacy of B.I. Kitaev - into the twenty-first century]. Yekaterinburg, 1998, pp. 95–97. (In Russ.)
21. Stefanovich M.A., Sibagatullin S.K., Gulyaev G.M., Shkurko E.F., Pishnograev S.N. Utilization of blast furnace process management tools. *Proizvodstvo chuguna* [Production of pig iron]. Sverdlovsk, 1982, vol. 8, pp. 99–107. (In Russ.)

Received 30/01/17

Accepted 20/03/17

Образец для цитирования

Терентьев Д.В. Исследование количества твердых осадков и пути их уменьшения с целью повышения ресурса узлов и механизмов доменных печей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 28–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-28-34>

For citation

Terentyev D.V. Studying the amount of solid deposit and the ways to reduce it in order to extend the life of blast furnace components. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 28–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-28-34>