

И. Г. Яковлева /д. т. н./

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua

А. А. Петрик

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: iternel17@mail.ru

Исследование влияния параметров продувки металла кислородом в конвертере на процесс пылеобразования механического (брызги) происхождения

I. G. Jakovleva /Dr. Sci. (Tech.)/,

Zaporizhzhya State Engineering Academy,
Zaporozhye, Ukraine
e-mail: yakovleva@zgia.zp.ua

А. А. Petrik

Zaporizhzhya State Engineering Academy,
Zaporozhye, Ukraine
e-mail: iternel17@mail.ru

The influence of the oxygen mode in the steel melting process on the process of the dust emission mechanical (splashes) origin

Цель. Определение зависимости массы пыли в отходящих газах от размера пузыря оксида углерода.

Методика. Достижение поставленной цели решалось путем:

– рассмотрения механизма образования пузырей при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом;

– установления расчетных зависимостей и ключевых параметров для определения количества пылевыведения.

Результаты. На основании данных изучения взаимодействия встречных потоков кислорода и паров конденсированных фаз на поверхности горения металла исследованы процессы пылеобразования при продувке расплава сталеплавильной ванны с позиции физико-гидродинамических и теплофизических особенностей состояния реакционной зоны. На основе моделирования разрыва пузырей оксида углерода установлена зависимость количества образовавшейся пыли от диаметра пузырей.

Научная новизна. Получена эмпирическая зависимость массы брызг от диаметра пузыря оксида углерода.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют оптимизировать тепловой режим и интенсивность продувки ванны кислородом для достижения минимальных выбросов пыли в окружающую среду. (Ил. 3. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: конвертер, пылеобразование, критический диаметр пузыря, реакционная зона, энергия, интенсивность продувки, тепловой режим, перепад давлений.

Постановка проблемы. Для создания эффективных режимов выплавки стали необходимо учесть экологические аспекты его работы, в частности количество пыли, образовавшееся при продувке расплава кислородом.

При исследовании процесса пылеобразования рассматривали два механизма образования пыли: механический (брызги) и испарительный (бурый дым).

Процесс пылеобразования изучали на примере 160-т конвертера.

В данной работе выполнено исследование механизма пылеобразования механического происхождения (брызги).

Формулировка цели. Целью исследования является определение зависимости массы пыли от размеров пузырей оксида углерода.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

– предложен механизм образования пузырей при продувке ванны сталеплавильного агрегата кислородом;

– установлены расчетные зависимости и ключевые параметры для определения количества пылевыведения.

Изложение основного материала. В результате продувки ванны кислородом на поверхность всплывают газовые пузыри оксида углерода. При рассмотрении процессов пылеобразования, протекающих на поверхности расплава, видно, что часть пузырей легко прорывает поверхностную пленку, другая часть некоторое время колеблется и меняет форму, перераспределяя энергию, небольшие пузырьки долгое время могут не лопаться, удерживаясь у поверхности, пока не сольются с другими пузырями.

От скорости всплывания пузырей и их размеров будут зависеть скорость выброса частиц расплава в газовую фазу и размеры этих частиц. Скорость всплывания больших пузырьков больше, чем маленьких, но при этом в процессе движения возможно дробление больших пузырей на мелкие.

При рассмотрении пузырей, которые достигли поверхности расплава и лопнули, можно представить, что основная масса брызг образуется за счет разрыва небольшой части тонкой поверхностной пленки (рис. 1), выступающей над расплавом [1]. В момент ее разрыва мельчайшие брызги устремляются вверх, а окружающая пузырь жидкость стремится заполнить возникшую пустоту, одновременно вызывая на поверхности расплава кольцевую волну, происходит так называемый разрыв поверхностного пузырька. Смыкаясь, она создает кумулятивную струю – выбрасывает вверх столбик жидкости, от подножья которого распространяется волна. Выброс металла также сопровождается образованием брызг, крупные капельки возвращаются обратно в ванну, мелкие капельки удаляются в газовую фазу.

Разрыв пузырьков возможен и в объеме расплава, если расплав не однороден по составу и

температуре. В этом случае часть пузырей может раствориться в объеме металла, не дойдя до поверхности расплава.

Следует отметить, что высокий уровень шума, сопровождающий процесс продувки, отчасти обязан своим происхождением процессам схлопывания пузырьков, как поверхностных, так и кавитационных, в результате которых в расплаве распространяются ударные волны [2], сопровождаемые шумом в разных звуковых диапазонах. Эти волны также играют определенную роль в поведении пузырей.

Важным параметром, позволяющим количественно оценить интенсивность пылеобразования, является толщина пленки и площадь поверхности разрыва пузырька. Другим не менее важным параметром является интенсивность образования пузырьков. Чтобы определить зависимость количества пузырей CO от интенсивности продувки, определим их средний размер.

Выделение CO в виде пузырьков возможно при выполнении условия [1; 2]:

$$\Delta p \geq p_{CO} = p_{ocm} + \rho \cdot g \cdot h + \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (1)$$

где ρ – плотность расплава, 7200 кг/м³; σ – поверхностное натяжение расплава, Дж/м²; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

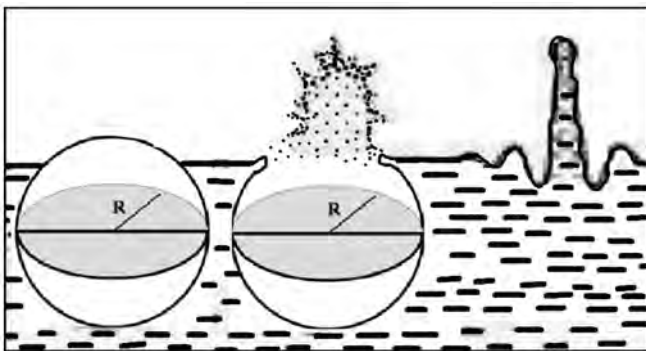
Размеры пузырей у поверхности расплава, т. е. при их минимальном расстоянии h (рис. 1) от поверхности, когда h равно его радиусу r , можно определить из выражения (1):

Продифференцировав уравнение (1) по r и приравняв нулю, получим:

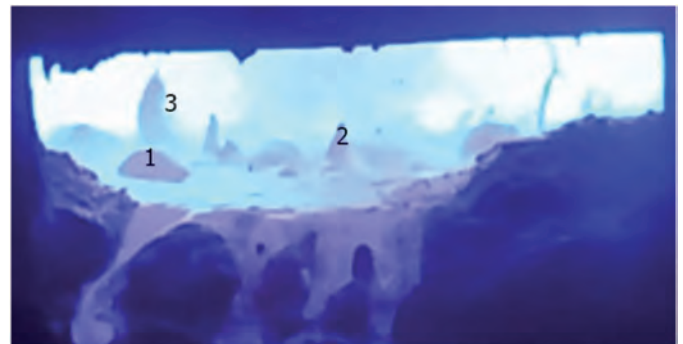
$$\frac{dp_{CO}}{dr} = \rho \cdot g - \frac{2 \cdot \sigma}{r^2} = 0 \quad (2)$$

$$r_{hmin} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g}} \quad (3)$$

Подставив полученное значение в уравнение (1), получим минимальный перепад давлений в пузырьке и в печи, Па:



а)



б)

Рис. 1. Схема и фото процесса разрушения пузырька на поверхности расплава:

1 – пузырь монооксида углерода (CO) на поверхности расплава;

2, 3 – разрыв пузырей на поверхности расплава

$$p_{\min} - p_{\text{ост}} = \rho \cdot g \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \sigma}}{\sqrt{\rho \cdot g}} + \frac{2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\rho \cdot g}}{\sqrt{2 \cdot \sigma}} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sigma} \quad (4)$$

В процессе продувки расплава кислородом, согласно реакции [1; 3] $[C] + 1/2O_2 = 2CO$, на 1 моль O_2 образуется 2 моля CO . Следовательно, на $1 \text{ м}^3 O_2$ будет образовываться $2 \text{ м}^3 CO$ (при предположении, что весь кислород затрачивается на окисление углерода). С учетом реальной температуры ванны объем образующегося CO будет равен, м^3 :

$$V_{CO2} = V_{CO} \cdot \frac{T_{\text{ванны}}}{T_{O2}} = 2 \cdot \frac{1873}{293} = 12,8 \quad (5)$$

Зная размер пузырей CO , можно определить их общее количество.

Пузырьки CO имеют разные размеры, поэтому количество пузырей согласно [2; 3] может быть разным. Распределение пузырей по размерам, особенно в момент разрыва, является важным показателем процесса пылеобразования.

Интенсивность пылеобразования зависит от размеров пузырьков CO . В работе [4] экспериментально получены данные (рис. 2) зависимости массы брызг от размера пузыря. Установлено, что небольшие пузырьки (диаметром менее 4,6 мм) разрываются без заметного образования брызг.

На основании приведенных данных рис. 2 рассчитали вынос пыли с учетом количества пузырей.

При диаметре одного пузыря d , объем одного пузыря, м^3 :

$$V_{\text{пуз}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (d)^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{R}{2}\right)^3 \quad (6)$$

Масса одного пузыря, кг:

$$m_{\text{пуз}} = V_{\text{пуз}} \cdot \rho_{CO} \quad (7)$$

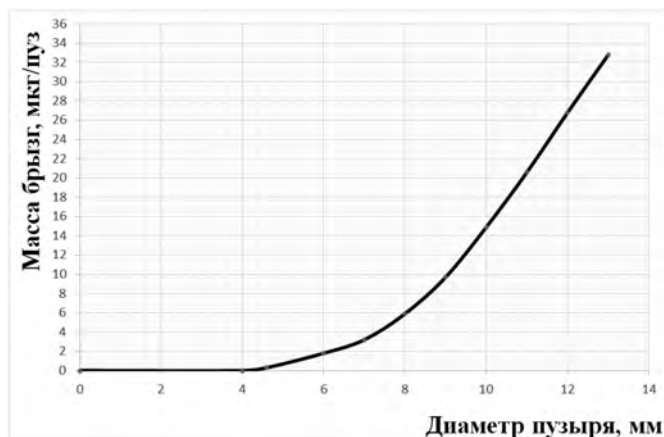


Рис. 2. Зависимость массы брызг от размера пузыря

Количество образовавшихся пузырей, разрывающихся на поверхности расплава, шт:

$$N_{\text{пуз}} = \frac{m_{CO}}{m_{\text{пуз}}} \quad (8)$$

Тогда суммарная масса пыли составит, кг на $\text{м}^3 O_2$:

$$m_{\text{пыли}} = N_{\text{пуз}} \cdot m_{\text{брызг}} \quad (9)$$

Общее количество пыли, образовавшееся в результате взаимодействия кислородной струи с расплавом, кг/т:

$$m_{\text{общ}} = m_{\text{пыли}} \cdot I_{\text{пр}O_2} \cdot K \quad (10)$$

где $I_{\text{пр}O_2}$ – удельный расход кислорода в период продувки, $\text{м}^3/\text{т}$; K – постоянная, учитывающая стехиометрические соотношения;

$$I_{\text{пр}O_2} = t \cdot I'_{\text{пр}O_2} / m_{\text{пл}} \quad (11)$$

где t – длительность продувки ванны кислородом, час; $I'_{\text{пр}O_2}$ – интенсивность продувки ванны кислородом, $\text{м}^3/\text{час}$; $m_{\text{пл}}$ – вес плавки, т.

На основании полученных данных построена зависимость массы пыли от размера пузыря (рис. 3).

Кривая на рис. 3 аппроксимирована зависимостью:

$$m_{\text{пыли}} = -0,007 \cdot d^2 + 0,167 \cdot d - 0,565 \quad (12)$$

Сравнение полученных результатов с данными литературных источников [1, 4] свидетельствуют о хорошей сходимости результатов исследования. При этом величина коэффициента корреляции составляет $R = 0,961$, что говорит о «высокой» сходимости расчетных и фактических данных.

Для снижения количества образования пыли в сталеплавильном агрегате необходимо подбирать рациональную интенсивность продувки с учетом положения фурм относительно расплава. Так как эффективность разрушения

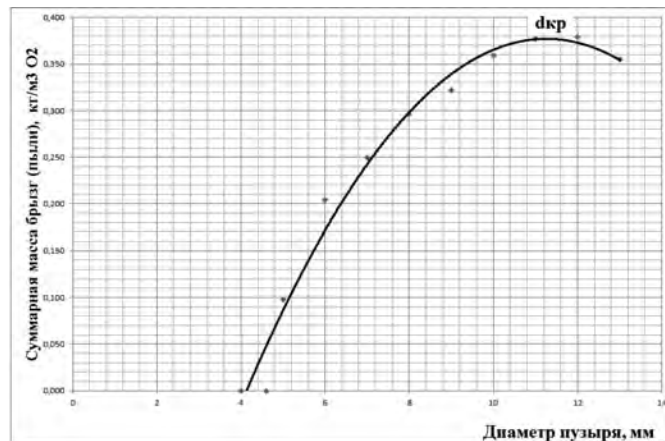


Рис. 3. Зависимость массы пыли от размера пузыря

[5–8] газовых пузырей изменяется при изменении расстояния фурмы от поверхности ванны и, соответственно, от глубины погружения кислородной струи в расплав. В режиме наиболее полного погружения струи кислорода в расплав эффективность разрушения газовых пузырей возрастает за счет усиления механического воздействия струи на расплав, что способствует улучшению степени его перемешивания, а размер пузырей газа в шлаковой фазе снижается.

Выводы

1. На основе анализа механизма разрыва пузырей оксида углерода установлена зависимость количества образовавшейся пыли от диаметра пузырей при продувке ванны кислородом, что позволяет определить рациональную интенсивность продувки с учетом положения фурм относительно расплава в ванне сталеплавильного агрегата.

2. В процессе исследования определено, что при увеличении диаметра пузырей суммарная масса пыли увеличивается до определенного критического диаметра $d_{кр}$, выше которого вынос пыли начинает снижаться.

Библиографический список / References

1. Rizescu C. Z. Heavy metals dust from furnace / C. Z. Rizescu, E. V. Stoian, C. Ittu // International Conference on Biomedical Engineering and Technology. – Singapore, 2011. – Pp. 137–141.

2. Юдашкин М. Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М. Я. Юдашкин. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.

Yudashkin M. Y. Pyleulavlivanie i ochistka gazov v chernoy metallurgii. Moscow, Metallurgiya, 1984, 320 p.

3. Черноусов П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии: монография / П. И. Черноусов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 428 с.

Chernousov P. I. Retsikling. Tekhnologii pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy i otkhodov v chernoy metallurgii. Moscow, Izd. DomMISiS, 2011, 428 p.

4. Несис Е. И. Кипение жидкостей / Е. И. Несис // Успехи физических наук. – 1965. – № 4. – С. 615–754.

Nesis E. I. Kipenie zhidkostey. Uspekhi fizicheskikh nauk, 1965, no. 4, pp. 615–754.

5. Явойский В. И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. Л. Дорофеев, И. Д. Повх. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.

Yavoyskiy V. I., Dorofeyev G. L., Povkh I. D. Teoriya produvki staleplavilnoy ванны. Moscow, Metallurgiya, 1974, 496 p.

6. Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.

Baptizanskiy V. I. Teoriya kislorodno-konverternogo protsessa. Moscow, Metallurgiya, 1975, 376 p.

7. Баптизманский В. И. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / В. И. Баптизманский, В. Б. Охотский. – К.: Высшая школа, 1981. – 184 с.

Baptizanskiy V. I., Okhotskiy V. B. Fiziko-khimicheskiye osnovy kislorodno-konverternogo protsessa. Kiyev, Vysshaya shkola, 1981, 184 p.

8. Сидоренко М. Ф. Теория и практика продувки металла / М. Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.

Sidorenko M. F. Teoriya i praktika produvki metalla. Moscow, Metallurgiya, 1974, 496 p.

Purpose. Determination of the mass of the dust from the size of a bubble of carbon monoxide.

Methodology. Achieving this purpose was solved by:
– consideration of the mechanism of dust formation by oxygen blowing the bath;

– establish settlement dependencies and parameters to determine the amount of dust emission.

Findings. That study based on the interaction counter mass fluxes of oxygen in the gas phase and the condensed phase combustion, which appears on the metal surface coated with the oxide film in the steel-smelting aggregates. To analyzed the dusting process under blowing of steel-smelting bath by oxygen from position of physics, hydrodynamic and thermophysical features of the state of reactionary zone. Based on modeling of carbon monoxide bubbles break the dependence of the amount of dusting formed on the diameter of the bubbles.

Originality. To obtained the empirical dependence of the mass of sprays from the diameter of the bubble of carbon monoxide.

Practical value. The positive results of the studies will allow to approach for solve the problem of optimization of thermal and oxygen steel smelting mode to achieve minimum emissions of dust into the environment.

Key words: converter, dusting, critical bubble diameter, the reaction zone, the energy, blowing intensity, heat and oxygen modes, the pressure drop

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 25.01.2017