

## МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ БУРОГО ДЫМА ПРИ ПЕРЕЛИВАХ ЧУГУНА

КРАВЕЦ В.А., ТЕМНОХУД В.А. (ДонГТУ), САРЖЕВСКИЙ В.Н. (ДонГУ)

*На основе теоретических расчётов и экспериментальных данных предложен механизм образования бурого дыма при переливах жидкого чугуна из ёмкости в ёмкость.*

Переливы чугуна из ёмкости в ёмкость являются необходимым звеном технологической цепочки в чёрной металлургии. Каждая порция металла на пути от доменной печи, при заливке в миксер, при сливе из миксера и при заливке в конвертер или мартен. При использовании миксерных чугуновозов число переливов сокращается до 3, но на Украине такая технология не применяется.

При каждом переливе в атмосферу выделяется в виде пыли 0,02–0,05% от массы переливаемого металла. Выделяющаяся пыль состоит из двух основных компонентов: на 10–20% из крупнодисперсной графитной пыли, которую легко уловить обычными циклонами, и на 75–85% из мелкодисперсного бурого дыма, аналогичного по свойствам бурому дыму сталеплавильных процессов и требующего для улавливания применения дорогостоящих, громоздких и сложных в эксплуатации электрофильтров или тканевых рукавных фильтров.

В настоящее время существует несколько теорий, в которых предлагаются различные механизмы образования бурого дыма в ходе сталеплавильных процессов, однако ни одна из них не является общепризнанной и ни одна не может быть в готовом виде применена для описания процесса дымообразования при переливах чугуна из ёмкости в ёмкость. Так, большинство исследователей старшего поколения считают, что бурый дым образуется в результате испарения железа или его оксидов из реакционной зоны при продувке металла кислородом [1–3]. Однако при переливах чугуна отсутствует реакционная зона со свойственными ей высокими температурами и, следовательно, испарительная теория не может объяснить образование бурого дыма в этом случае.

В работах [4, 5] показано, что образование мельчайших капель металла, по размерам соответствующих частицам бурого дыма, может происходить в результате термического диспергирования поверхностной плёнки металла в зоне контакта кислородной струи с поверхностью жидкого чугуна. При этом в результате экзотермических реакций, эта поверхность разогревается и возникает сильный градиент температуры в микроскопическом поверхностном слое металла. Это приводит к появлению волн, распространяющихся в металле со скоростью звука. При таких условиях металл ведёт себя как квазитвёрдое вещество и может крошиться. Куски металла выбрасываются в газовую фазу, где принимают сферическую форму. По мнению авторов работ [4, 5], такой механизм является основной причиной образования бурого дыма в начале и середине плавки, а в конце плавки некоторую роль приобретает физическое испарение. Эта гипотеза не объясняет образования бурого дыма при переливах чугуна, когда отсутствует взаимодействие ванны со струёй кислорода и возникновение сильного температурного градиента невозможно.

Другие авторы считают, что бурый дым в сталеплавильных агрегатах образуется в результате сгорания в струе кислорода мельчайших капелек металла, выбрасываемых в газовую фазу в результате всплывания пузырей монооксида углерода при кипении ванны [6, 7]. Однако при переливах чугуна не происходит кипения ван-

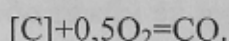
ны, а образующиеся при механическом дроблении металла брызги имеют средний размер около 1 мм, что примерно в 100 раз крупнее капель, выносимых в газовую фазу всплывающими пузырями CO и в 1000 раз крупнее частиц бурого дыма. Столь крупные брызги не могут сгореть при полёте в воздухе и, следовательно, не могут быть прямым источником образования бурого дыма.

В то же время наблюдения за процессом выделения бурого дыма при наполнении ковша чугуном показывают, что пылеобразование наиболее интенсивно в начальный период наполнения ёмкости, когда струя металла ударяется о футеровку, и количество образующихся брызг максимально. В дальнейшем на дне ёмкости образуется слой жидкого металла, смягчающий удар, количество брызг уменьшается и одновременно, в 1,3–2,5 раз уменьшаются выбросы бурого дыма. При осторожных переливах с небольшой высоты чугун вообще не дымит. Очевидно, процесс пылеобразования тесно связан с процессом диспергирования металла, а наличие брызг является необходимым звеном процесса образования бурого дыма. Другим необходимым условием является наличие окислительной атмосферы. Это позволяет предположить, что причиной образования бурого дыма является взаимодействие брызг металла с кислородом газовой фазы.

Рассмотрим процесс взаимодействия капли с окислительной атмосферой. Возможны 3 варианта взаимодействия:

- режим поверхностного горения углерода и других примесей, имеющих более высокое сродство к кислороду, чем железо;
- режим окисления углерода внутри капли через слой закиси железа на поверхности брызг;
- режим тотального горения капли.

Оценим вероятность осуществления каждого режима в реальных условиях. Предположим, что концентрация кислорода на поверхности капли равна нулю, т.е. каждая молекула кислорода, достигнув поверхности, немедленно вступает в реакцию. При режиме поверхностного горения углерода скорость диффузии углерода к поверхности капли должна быть такой, чтобы обеспечивать реакцию:



С другой стороны, скорость диффузии кислорода из газовой фазы не должна превышать скорости поступления углерода, в противном случае реакция должна перемещаться вглубь капли. Таким образом, в случае равенства скоростей поступления кислорода и углерода к поверхности капли их концентрация на поверхности равна нулю. Очевидно, существует критическая концентрация кислорода в газовой фазе, обеспечивающая режим поверхностного горения углерода. Найдём эту концентрацию из условия

$$\frac{16}{12} \beta_c [C] = \beta_o O_{кр}, \quad (1)$$

где  $\beta_c$  — коэффициент массопереноса углерода в металле, м/с;  $\beta_o$  — коэффициент массопереноса кислорода в газовой фазе, м/с;  $[C]$  — концентрация углерода в металле, кг/м<sup>3</sup>;  $O_{кр}$  — критическая концентрация кислорода в газовой фазе, обеспечивающая режим поверхностного горения, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициенты массопереноса определим из выражений:

$$\beta_c = \frac{Sh_M D_c}{d}; \quad (2)$$

$$\beta_o = \frac{Sh_\Gamma D_o}{d}, \quad (3)$$

где  $Sh_M$  и  $Sh_\Gamma$  — критерий Шервуда для металла и газа соответственно;  $D_c$  и  $D_o$  — коэффициенты диффузии углерода в металле и кислорода в газе соответственно,  $m^2/c$ ;  $d$  — диаметр капли, м.

Подставляя выражения (2) и (3) в (1) после преобразования получим

$$O_{кр} = \frac{16 Sh_M D_c}{12 Sh_\Gamma D_o} [C]. \quad (4)$$

Величину  $Sh_\Gamma$  найдём из выражения [8]:

$$Sh_\Gamma = 0,95 Re^{0,5} Sc^{0,33}, \quad (5)$$

где  $Re$  и  $Sc$  — критерии Рейнольдса и Шмидта соответственно.

$$Sc = \frac{\nu}{D_o}, \quad (6)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха,  $m^2/c$ .

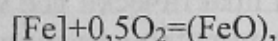
Температура газов в потоке выбросов составляет около  $200^\circ C$ . При этой температуре  $\nu = 5 \cdot 10^{-5} m^2/c$ ;  $D_o = 6 \cdot 10^{-5} m^2/c$ ;  $Sc = 0,8$ . Скорость потока газа, омывающего каплю, примем равной скорости, приобретаемой каплей в момент образования при ударе струи о дно ковша, которая может быть вычислена по формуле

$$w = \sqrt{2gh}, \quad (7)$$

где  $h$  — высота падения струи металла, м.

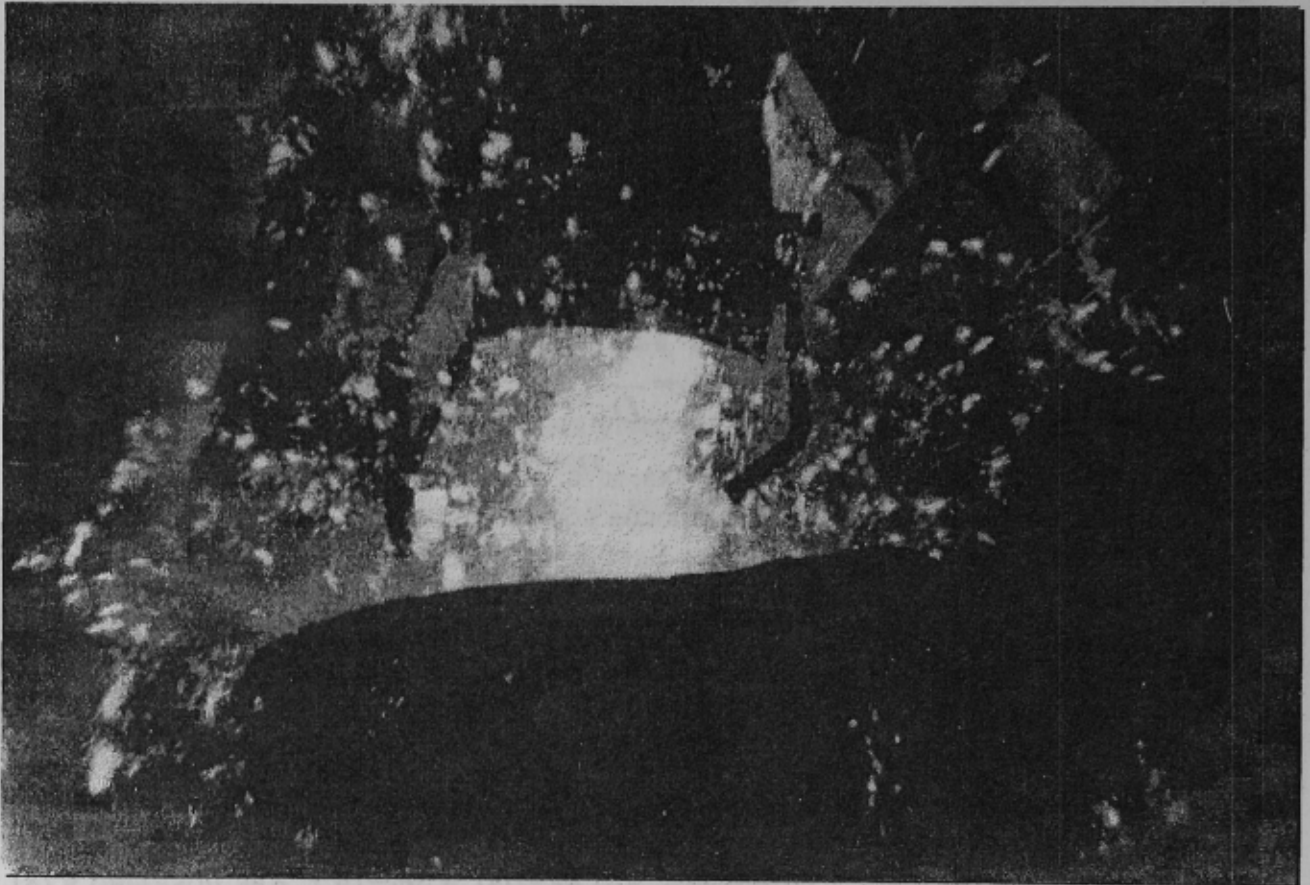
Для случая слива чугуна из 2500-тонного миксера в 350-тонный ковш рассчитанная по выражению (7) скорость брызг металла составит около 13 м/с. Учитывая, что средний размер брызг 1 мм получим, что  $Re = 260$ , а  $Sh_\Gamma = 14,2$ . Как показано в [8] для капель железоуглеродистой расплава при  $Re < 6300$   $Sh_M = 6,6$ . Подставляя численные значения  $Sh_\Gamma$  и  $Sh_M$  в (4) и учитывая, что  $D_c = 3 \cdot 10^{-9} m^2/c$ , а  $[C] = 280 \text{ кг/м}^3$  получим  $O_{кр} = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$  или выражая концентрацию кислорода в объёмных процентах  $O_{кр} = 0,67\% \text{ об.}$

В условиях перелива чугуна концентрация кислорода в газовой фазе всегда значительно превышает эту величину, т.е. внешний поток кислорода к поверхности капли всегда превышает поток углерода изнутри. Вследствие этого режим поверхностного окисления углерода в реальных условиях невозможен, а на поверхности капли будет окисляться преимущественно железо по реакции



что приводит к образованию на поверхности капли закисного слоя. Реакция окисления углерода в этом случае перемещается вглубь металла, в результате чего внутри капли образуется пузырёк CO. Эта реакция должна приводить к взрыву капли. При этом образуются более мелкие брызги, которые могут служить источником образования бурого дыма.

Процесс взрыва брызг чугуна во время перелива был подтверждён экспериментально в промышленных условиях. На рисунке 1 показана фотография слива чугуна из 2500-тонного миксера в 350-тонный ковш. Во время слива в ковш подавался газообразный азот, благодаря чему подавлялся процесс образования бурого дыма, поэтому на снимке отчётливо видны элементы конструкций, струя чугуна и отдельные брызги. Из фотографии видно, что крупные брызги металла в полёте взрываются с образованием множества мелких капель. Это подтверждается также исследованием брызг чугуна, образующихся при сливе металла из миксера в ковш.



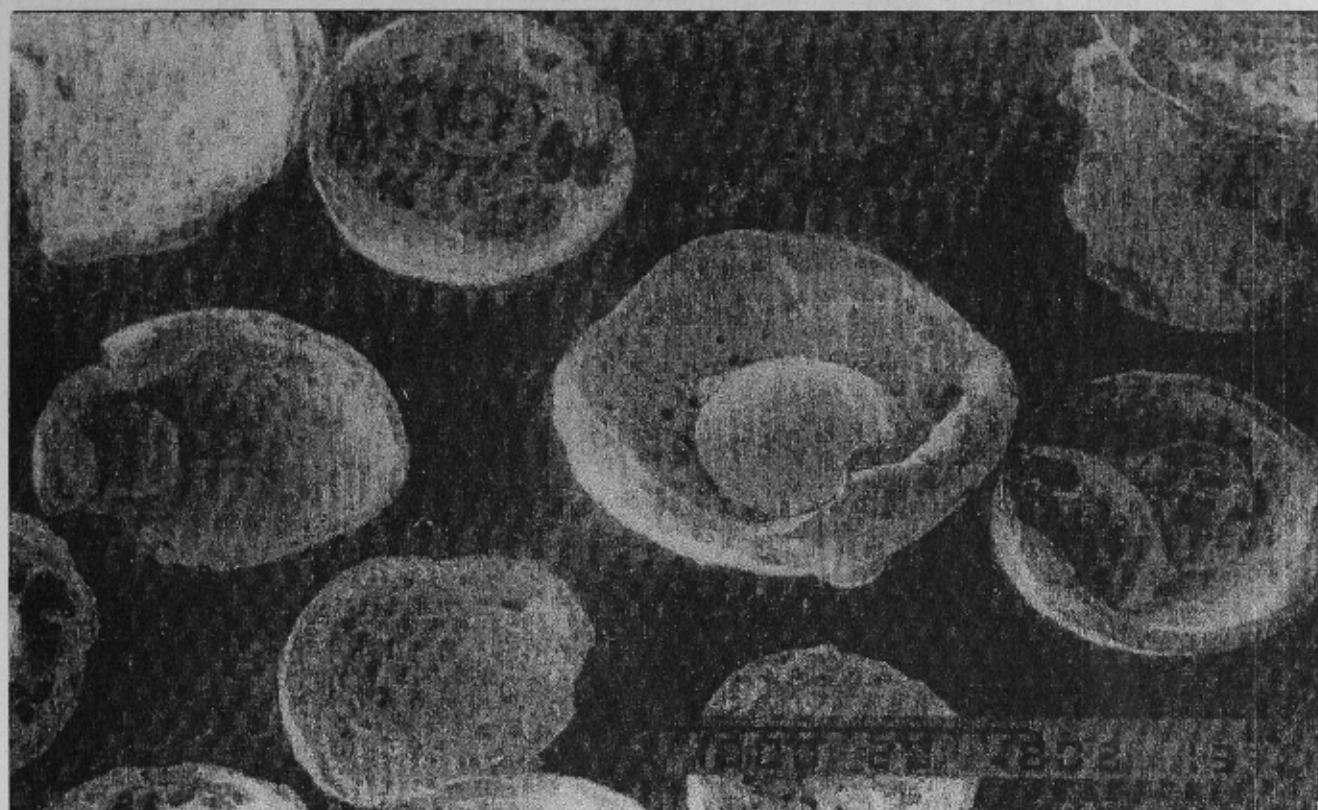
**Рисунок 1** — Фотография процесса слива чугуна из 2500-тонного миксера в 350-тонный ковш в миксерном отделении конвертерного цеха металлургического комбината «Азовсталь»

Для улавливания брызг металла из общего потока выбросов в миксерном отделении конвертерного цеха металлургического комбината «Азовсталь» был сооружён встроенный в газоход аспирационной системы инерционный брызгоуловитель типа ВМ, представляющий собой бункер, установленный под отверстием в газоходе, прорезанном в месте поворота газохода на  $90^\circ$  в вертикальной плоскости.

Брызгоуловитель улавливал практически все металлические частицы, а также наиболее крупные и загрязнённые металлом частицы графита и шлака. Уловленная пыль разделялась магнитом, причём 85% частиц (по массе) составляли застывшие брызги чугуна.

Для исследования брызг использовался растровый электронный микроскоп JSM-T300. Объекты исследовались в отражённом свете. Было установлено, что большая часть исследованных брызг носила явные следы взрыва пузырька газа: в брызгах имелись полости, рваные отверстия, многие частицы представляли собой

осколки более крупных полых сфер. Было установлено, что доля взорвавшихся брызг возрастала с ростом размера капли. На рисунках 2 и 3 представлены фотографии различных фракций брызг металла. В правом нижнем углу каждой фотографии линией показан масштаб снимка. Цифрами указаны слева направо: длина характерного размера (в мкм), увеличение объектива микроскопа, дата и номер кадра.



**Рисунок 2** — Вид под микроскопом брызг чугуна

В таблице 1 представлены результаты изучения по фотографиям частиц различных фракций. Из таблицы 1 видно, что брызги размером более 250 мкм взрываются со 100% вероятностью. Чем меньше размер капель, тем меньше вероятность взрыва. Изучение брызг размером менее 32 мкм показало, что большинство частиц этой фракции не имеют следов взрыва, а небольшая часть взорвавшихся капель явно представляют собой осколки более крупных брызг. Таким образом, можно считать размер 32 мкм нижней границей процесса взрыва.

**Таблица 1** — Доля взорвавшихся частиц при переливах чугуна

Фракция, мкм	Средний размер частиц в фракции, мкм	Общее число частиц в данной фракции	Число взорвавшихся частиц	Вероятность взрыва, %
1-2	1,5	16	0	0
2-4	3	216	0	0
4-8	6	620	0	0
8-16	12	725	7	0,97
16-32	24	683	32	4,7
32-63	48	366	61	16,7
63-125	94	116	44	37,9
125-250	188	7	4	57,1
250-500	375	6	6	100

Продолжение таблицы 1

500-1000	750	6	6	100
1000-2000	1500	2	2	100

Таким образом, изучение брызг металла, образующихся при переливах чугуна, показало, что в результате взаимодействия брызг с кислородом воздуха часть капель взрывается. Существуют критические размеры капель, определяющих вероятность взрыва. Так, капли размером менее 30 мкм не взрываются. Капли размером более 250 мкм взрываются со 100% вероятностью. Капли промежуточных размеров от 30 до 250 мкм взрываются с тем большей вероятностью, чем больше размер капли.

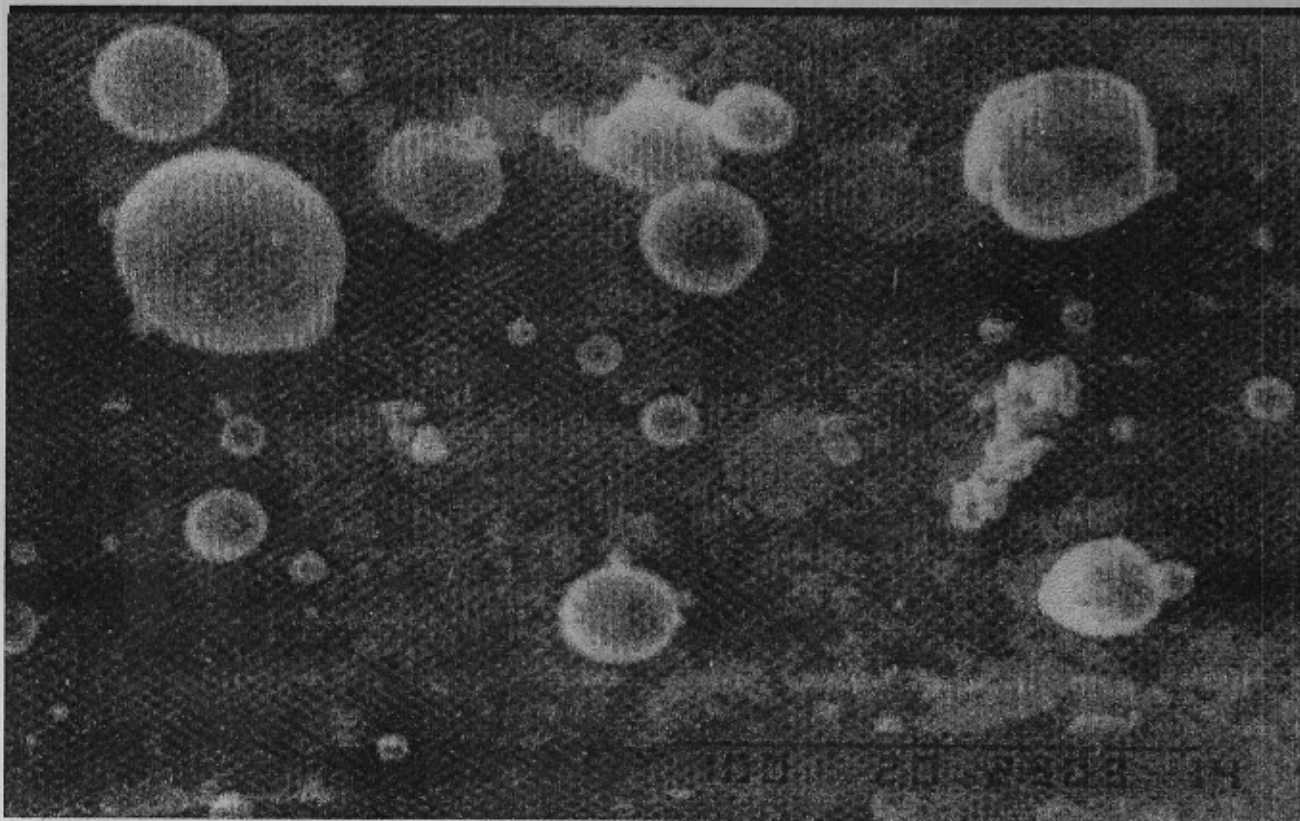


Рисунок 3 — Вид под микроскопом брызг чугуна

Капли металла размером менее 40 мкм при окислении должны нагреваться до высоких температур. Первым этапом окисления здесь также должно быть образование оксидной плёнки, толщина которой по экспериментальным данным составляет в среднем 2 мкм [7]. Оценим температуру разогрева в предположении, что процесс образования оксидной плёнки практически мгновенен и выделяющееся тепло полностью расходуется на нагрев капли. Тогда уравнение теплового баланса капли можно записать следующим образом

$$mc\Delta T = \pi d^2 \delta r q, \quad (8)$$

где  $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho$  — масса капли, кг;  $c$  — теплоёмкость жидкого чугуна, Дж/(кг К);  $\delta$  — толщина оксидной плёнки, м;  $\rho$  — плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $q$  — теплота окисления железа при температуре 1300°C, Дж/кг;  $\Delta T$  — температура перегрева.

Результаты расчёта температуры разогрева капль в зависимости от диаметра капли приведены в таблице 2.

**Таблица 2** — Зависимость температуры разогрева капль от диаметра капли

<i>d</i> , мкм	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>t</i> , °С	6580	3940	3060	2620	2360	2180	2055	1960	1890	1830

Начальная температура капли принята 1350°С. Видно, что капли диаметром 40 мкм и менее нагреваются до температур превышающих температуру разрушения оксидной плёнки — 2500°С. Поэтому процесс интенсивного окисления капли будет продолжаться. Учитывая, что температура кипения железа составляет 2750–2770°С, можно сделать вывод, что капли нагретые до температуры разрушения защитной плёнки затем вскипают. Интенсивное испарение железа и его оксидов приводит к образованию бурого дыма.

Таким образом, на основе выполненных расчётов и экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что механизм образования бурого дыма при переливах чугуна является сложным, многостадийным процессом, включающим следующие стадии:

- диспергирование струи чугуна в результате удара о футерованное дно ёмкости или зеркало металла с образованием большого числа крупных брызг;
- взаимодействие этих брызг с кислородом газовой фазы, образование на поверхности капль оксидного слоя и разогрев капль в результате экзотермической реакции окисления железа;
- охлаждение капль, образование в них пузырька монооксида углерода и взрыв капль с образованием мелких брызг. Интенсивность взрывов в условиях перелива чугуна практически не зависит от концентрации кислорода в газовой фазе. Лимитирующим звеном является процесс зарождения пузырька в объёме капли на поверхности частичек графита;
- взаимодействие капль диаметром менее 40 мкм, образующихся в результате взрыва крупных капль, с кислородом газовой фазы. Разогрев капль до высоких температур, что вызывает интенсивное испарение железа и его оксидов с поверхности капли и образование бурого дыма. Процесс окисления капли идёт в режиме тотального горения.

### Список литературы

1. Явойский В.Н., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. — М.: Металлургия, 1974. — 496 с.
2. Меджибожский М.Я., Фатхи Т. Математическая модель процесса дымообразования при продувке сталеплавильной ванны сверху кислородом. Сообщение 1 // Известия вузов. Чёрная металлургия, 1980. — № 2. — С. 48–52.
3. Меджибожский М.Я., Фатхи Т. Математическая модель процесса дымообразования при продувке сталеплавильной ванны сверху кислородом. Сообщение 2 // Известия вузов. Чёрная металлургия, 1980. — № 6. — С. 21–25.
4. Явойский В.Н., Славин В.И. Обзор гипотез пылеобразования при продувке металла в конвертере // Сталь, 1986. — № 10. — С. 15–18.
5. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в чёрной металлургии / А.И. Толочко, О.В. Филиппов, В.И. Славин, В.С. Гурьев — М.: Металлургия, 1986 — 208 с.
6. Поляков А.Ю., Макарова Н.Н. Закономерности образования бурого дыма при взаимодействии расплавов железо-углерод с кислородом // Сталь, 1974. — № 5. — С. 409–413.
7. Поляков А.Ю. Теоретические основы рафинирования сталеплавильной ванны — М.: Наука, 1975. — 200 с.
8. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. — К. — Донецк: Выща школа, 1981. — 184 с.

© Кравец В.А., Темнохуд В.А., Саржевский В.Н., 1999.