

УДК 669.162.252

В. А. КРАВЕЦ* (канд. техн. наук, доц.),
В. А. ТЕМНОХУД** (канд. техн. наук, доц.)

* - Донбасская национальная академия архитектуры и строительства,

** - ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ БУРОГО ДЫМА ПРИ ПЕРЕЛИВАХ ЧУГУНА

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

бурый дым, чугун, миксер, атмосфера, кислород, металл

Переливы чугуна являются необходимым звеном технологии в чёрной металлургии. Каждая порция металла на пути от домны до сталеплавильного агрегата переливается 4 раза: при выпуске чугуна из 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 пока 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 аппаратов - электрофильтров или тканевых рукавных фильтров.

В настоящее время существует несколько теорий 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 [1,2]. Но 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 [3,4] 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 [3,4], 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 [5,6].

Однако, при переливах чугуна не происходит кипения ванны, 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 [7].

Это позволяет предположить, что причиной образования бурого дыма является взаимодействие брызг металла с кислородом газовой фазы.

Для проверки этого предположения были выполнены исследования брызг чугуна, образующихся при сливе металла из миксера в ковш.

Для улавливания брызг металла из общего потока выбросов в миксерном отделении конвертерного цеха меткомбината «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° в вертикальной плоскости. Встроенный в газоход брызгоуловитель показан на рис.1. Брызгоуловитель улавливал практически все металлические частицы, а также наиболее крупные и загрязнённые металлом частицы графита и шлака. Уловленная пыль разделялась магнитом, причём 84,85% частиц (по массе) составляли застывшие брызги чугуна. В табл.1 представлено распределение брызг чугуна по гранулометрическому составу по результатам ситового анализа.

Таблица 1 - Гранулометрический состав брызг чугуна из брызгоуловителя

Фракция, мм	> 1	1-0,4	0,4-0,31	0,31-0,18	0,18-0,125	0,125-0,1	0,1-0,071	0,071-0,063	0,063-0,05	< 0,05
% по массе	0,35	28,64	22,04	30,41	10,4	3,7	2,2	0,35	0,59	1,32

Как видно из табл. 1 распределение брызг металла по гранулометрическому составу подчинено нормально-логарифмическому закону распределения. Среднемедианный размер уловленных брызг составил 430 мкм.

В табл. 2 представлен химический анализ брызг металла. Анализ выполнялся в лаборатории химического анализа ДонНИИЧермет по стандартным методикам.

Из табл.2 видно, что основную массу брызг составляет окисленное и металлическое железо, а содержание углерода снижено по сравнению с чугуном в результате процессов обезуглероживания и выделения СО. Высокая доля окисленного железа свидетельствует об интенсивности окислительных процессов в каплях. Об этом же свидетельствует пониженное, по сравнению с расплавом чугуна, содержание углерода в брызгах.

Брызги чугуна исследовались под микроскопом. Для этого использовался растровый электронный микроскоп JSM-T300. Объекты исследовались в отражённом поляризованном свете.

На рис.2- 4 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 исследования и номер кадра.

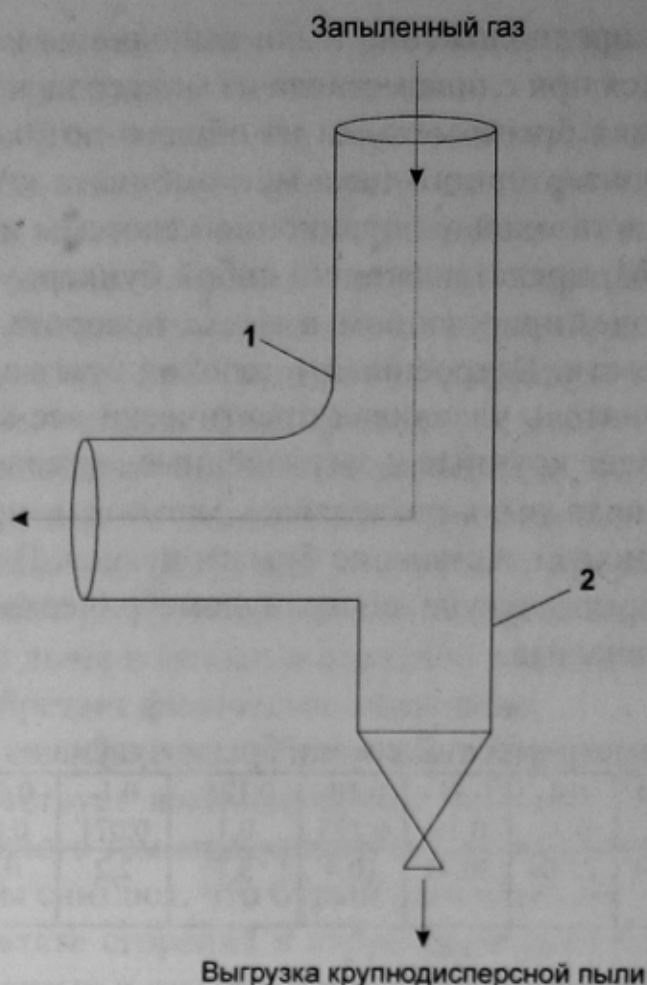


Рисунок 1. Встроенный в газоход брызгоуловитель: 1-поворот газохода на 90° ; 2-бункер для брызг.

Таблица 2 - Химический состав брызг чугуна

Компонент	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	C	Остальные компоненты
% по массе	6,02	26,2	62,6	2,6	2,51	0,07

Было установлено, что значительная 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 также, что доля взорвавшихся брызг возрастала с ростом размера капли.

Из фотографий видно, что по мере уменьшения размера частиц доля взорвавшихся капель снижается. Среди капель размером менее 32 мкм взорвавшиеся частицы отсутствуют. В то же время осколки крупных брызг носят явные следы неоднократных взрывов.

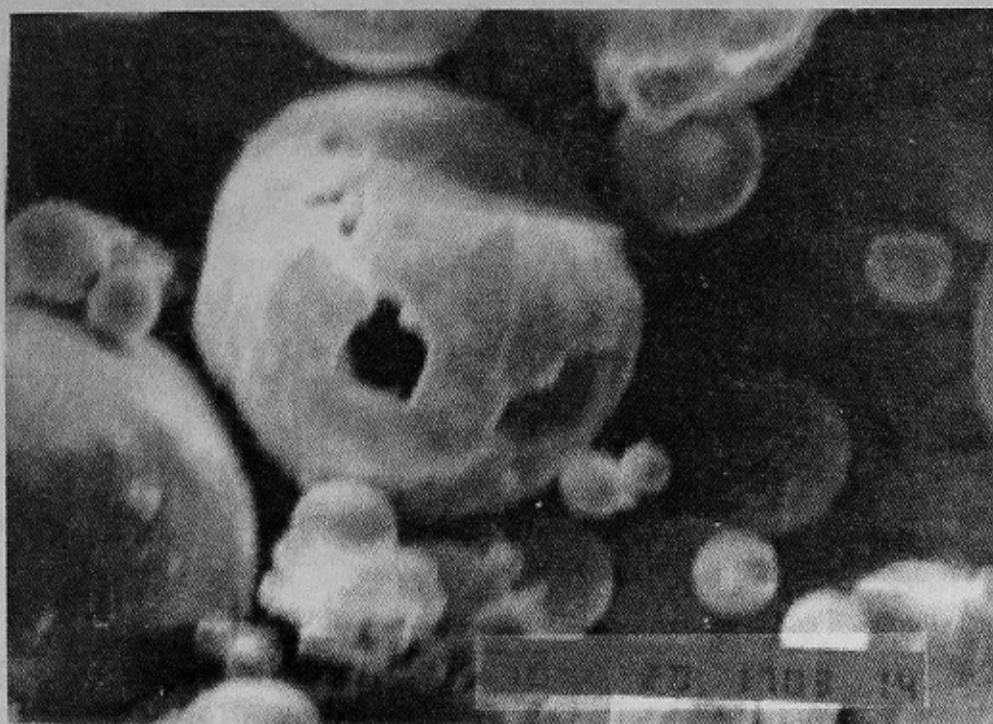


Рисунок 2 - Вид под микроскопом брызг чугуна, фракция до 100 мкм. Видна частица диаметром около 100 мкм со следами взрыва. В то же время мелкие частицы не имеют следов взрыва.

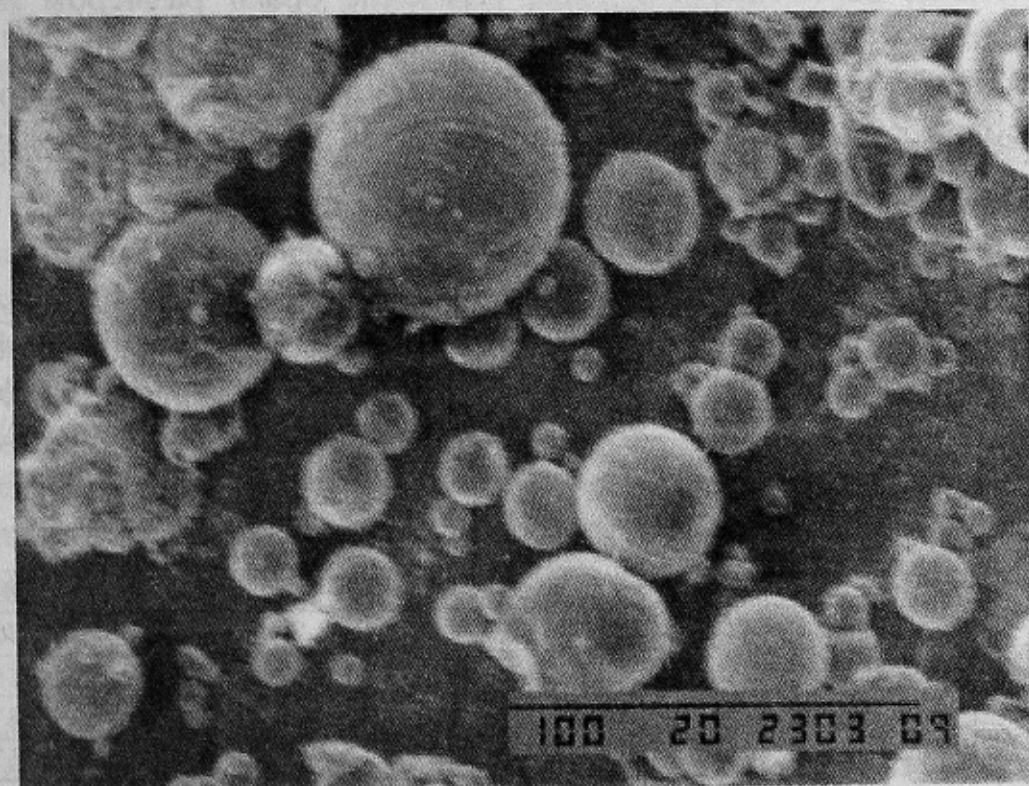


Рисунок 3. - Вид под микроскопом брызг чугуна, фракция менее 32 мкм. Частицы со следами взрыва отсутствуют

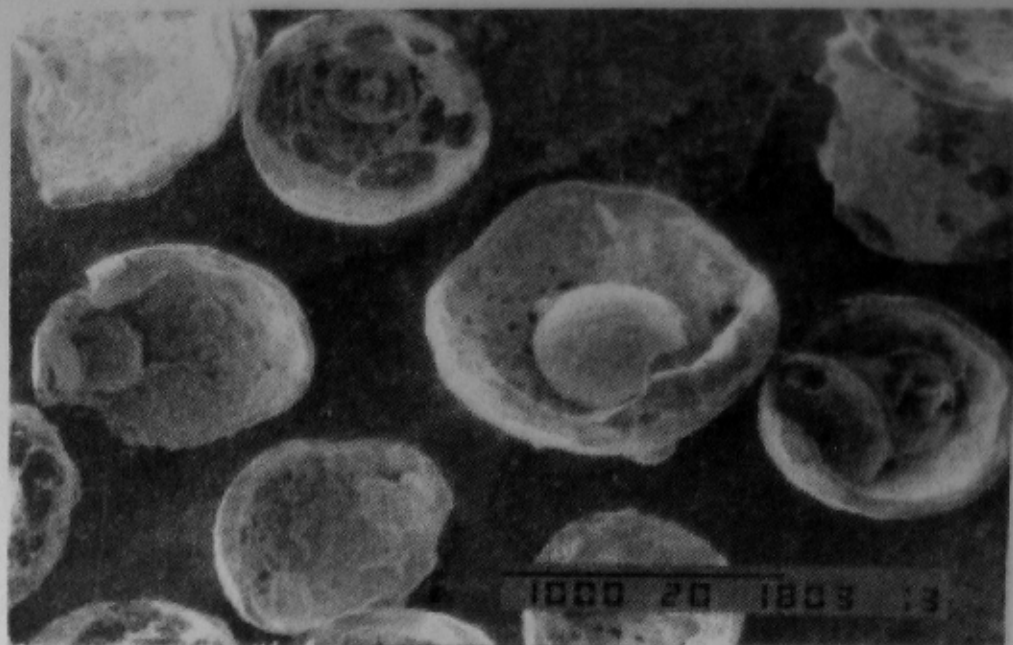


Рисунок 4 - Вид под микроскопом брызг чугуна, фракция 1-2 мм. 100% частиц носят следы взрыва.

В табл. 3 представлены результаты изучения по фотографиям частиц различных фракций. Из табл. 3 видно, что брызги диаметром более 250 мкм взрываются со 100% вероятностью. Чем меньше размер капли металла, 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 3 - Доля взорвавшихся частиц при переливах чугуна.

Фракция, мкм	Средний размер частиц в фракции, мкм	Общее количество частиц в данной фракции	Количество 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
500-1000	750	6	6	100
1000-2000	1500	2	2	100
Более 2000	-	0	0	-

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 32 мкм не взрываются. Капли размером 250-1000 мкм взрываются со 100% вероятностью. Капли промежуточных размеров, от 32 до 250 мкм, взрываются с тем большей вероятностью, чем больше размер капли. Под вероятностью, в данном случае, понимается отношение количества взорванных частиц к общему числу частиц в данной фракции.

Экспериментальные данные были обработаны с целью получения регрессионной зависимости с помощью программы MathCAD. Результаты эксперимента хорошо описываются зависимостью

$$P=1-\exp(-0,16625 \frac{D}{D_0}), \quad (1)$$

где P – вероятность взрыва, выраженная в долях от единицы;

D – диаметр капли металла, мкм;

D_0 – минимальный диаметр капли, при которых начинаются взрывные процессы, мкм.

В данном случае было принято, что $D_0=30$ мкм.

Факт взрыва крупных капель металла во время перелива чугуна был подтверждён также исследованием фотографий и киноплёнок, выполненных при сливе чугуна из миксера в ковш в миксерном отделении конвертерного цеха меткомбината «Азовсталь». На рис.6 приведена одна из таких фотографий, выполненная при подаче газообразного азота в ковш, благодаря чему над ковшом почти отсутствуют выбросы бурого дыма и хорошо видны брызги металла и элементы конструкций. На фотографии отчётливо видно, что брызги металла при полёте в воздухе взрываются с образованием большого количества мелких брызг.

Образовавшиеся в результате взрыва брызги диаметром менее 32 мкм окисляются в режиме тотального горения, разогреваются до температуры свыше 2500°C и испаряются. Пары железа и закиси железа доокисляются в газовой фазе до высшего окисла Fe_2O_3 , затем происходит конденсация и агрегатирование, и образуются, собственно, частицы бурого дыма.

Для подтверждения этих выводов исследовалась пыль, отобранная из потока выбросов в газоходе после циклонов ЦН-15 в миксерном отделении конвертерного цеха меткомбината «Азовсталь».

Улавливание пыли для анализа производилось при помощи специально сшитого рукава из фильтровальной ткани ТФ-200 ч. Отвод запыленного

газа для фільтрації через рукав вироблявся при допомозі пылесоса с соблюдением принципа изокинетичности. Химический анализ производился по ГОСТ 23581.22-81 в химической лаборатории ДонНИИЧермет. Результаты анализа приведены в табл. 4.

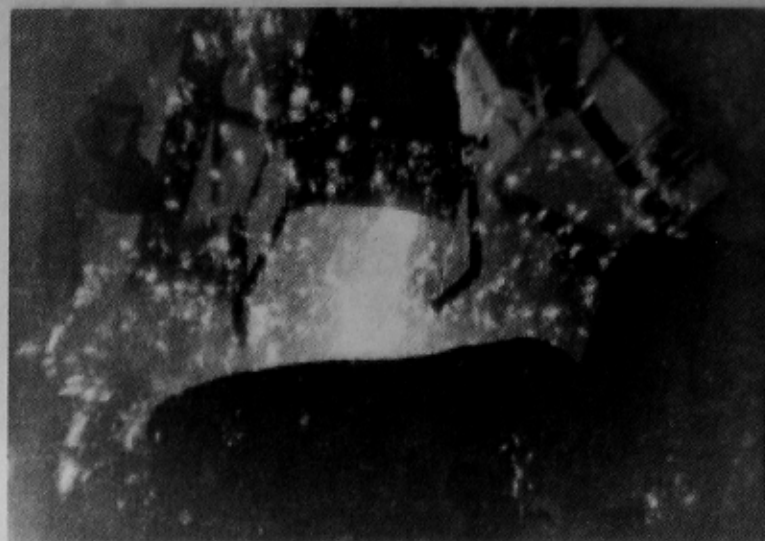


Рисунок 5 - Слив чугуна из 2500-тонного миксера в 350-тонный ковш в миксерном отделении конвертерного цеха меткомбината «Азов-сталь». Видны взрывающиеся брызги чугуна.

Таблица 4 - Химический состав пыли (бурого дыма), отобранной из потока выбросов после циклонов ЦН-15.

Компонент	Fe _{общ.}	Fe _{мет.}	FeO	Fe ₂ O ₃	C	Остальные компоненты
% вес.	66,71	0,13	5,5	89,2	1,07	4,1

Как видно из табл. 4, пыль, выбрасываемая в атмосферу после циклонов ЦН-15, примерно на 95% состоит из оксидов железа, т.е. это бурый дым.

Исследование пыли под микроскопом показало, что частицы бурого дыма имеют сферическую форму и следующий гранулометрический состав, приведенный в табл. 5.

Таблица 5 - Гранулометрический состав бурого дыма по данным микроскопического анализа

Фракция, мкм	Менее 1	1-3	Более 3
% по количеству частиц	90	9,1	0,9

Форма и размеры частиц свидетельствуют в пользу испарительно-конденсационного происхождения частиц бурого дыма.

В микроскоп было видно, что сферические частицы бурого дыма способны образовывать цепочечные агрегаты, преимущественно из 3-4 частиц. В пыли присутствовало также в виде механической примеси незначительное количество пластин графита размером до 10 мкм, попавших в выбросы в результате проскока через циклоны ЦН-15. Поскольку отделить эти частицы из смеси не удалось, то данные химического анализа содержат также и состав этих частиц. Этим объясняется наличие незначительного количества примесей (около 5%), тогда как сами частички бурого дыма состоят, вероятно, практически полностью из окисленного железа.

Схема процесса образования бурого дыма при переливах чугуна показана на рис.6.

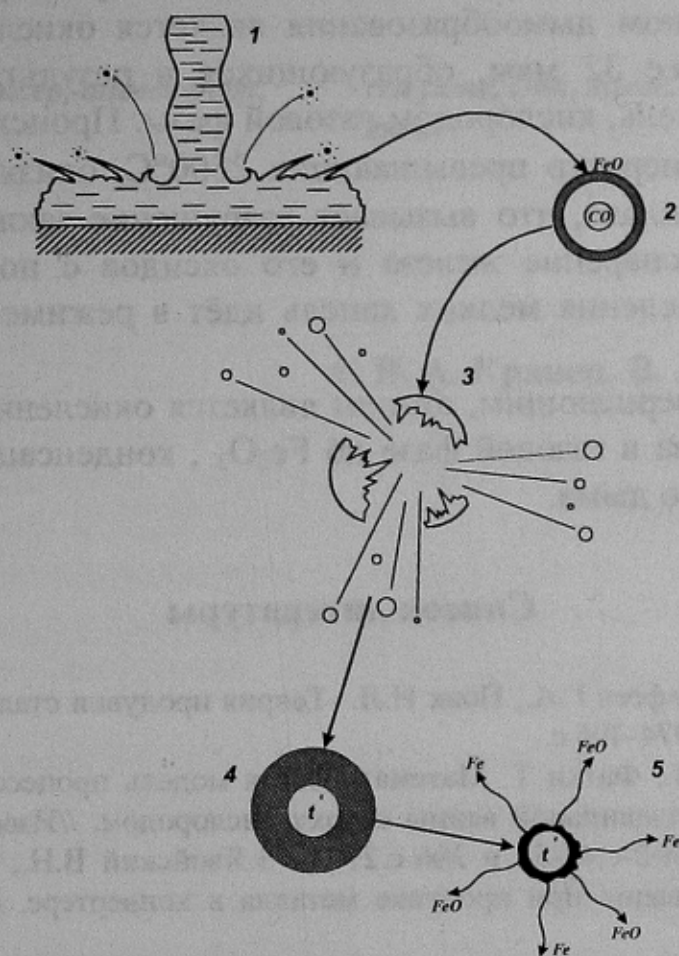


Рисунок 6 - Стадии образования бурого дыма при переливах чугуна: 1-диспергирование струи чугуна при ударе; 2-образование закисной плёнки на поверхности крупных брызг и пузырька монооксида углерода внутри; 3-взрыв капли; 4-окисление и разогрев мелких капель; 5-испарение капль.

Таким образом, экспериментально изученные свойства пыли, образующейся при переливах чугуна, свидетельствуют в пользу следующих представлений о механизме дымообразования.

1. Бурый дым образуется в результате взаимодействия брызг металла с кислородом газовой фазы. Наличие брызг и окислительной атмосферы является обязательными условиями дымообразования при переливах чугуна.
2. Первым этапом дымообразования является взрыв крупных брызг в результате выделения пузырька монооксида углерода в объёме капли. Факт взрыва капель при переливах чугуна доказан экспериментально. Установлено, что вероятность взрыва зависит от размера капли. Брызги крупнее 250 мкм взрываются всегда, брызги менее 32 мкм – не взрываются, брызги промежуточных размеров взрываются с тем большей вероятностью, чем больше их размер.
3. Вторым этапом дымообразования является окисление капель диаметром менее 32 мкм, образующихся в результате взрыва более крупных капель, кислородом газовой фазы. Происходит разогрев капель до температур превышающих 2500°C, близких к температуре кипения расплава, что вызывает разрушение закисной плёнки, интенсивное испарение железа и его оксидов с поверхности капли. Процесс окисления мелких капель идёт в режиме тотального горения.
4. Третьим, завершающим, этапом является окисление паров железа и закиси железа в газовой фазе до Fe_2O_3 , конденсация и образование частиц бурого дыма.

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. // Известия вузов. Чёрная металлургия. - 1980 - №2 - с.48-52 и №6 - с.21-25. 3. Явойский В.Н., Славин В.И. Обзор гипотез пылеобразования при продувке металла в конвертере. // Сталь. - 1986 - №10 - с.15-18.
4. Толочко А.И., Филиппев О.В., Славин В.И., Гурьев В.С. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в чёрной металлургии. - М.: Металлургия - 1986 - 208 с.
5. Поляков А.Ю., Макарова Н.Н. Закономерности образования бурого дыма при взаимодействии расплавов железо-углерод с кислородом. // Сталь. - 1974 - №5 - с.409-413.
6. Поляков А.Ю. Теоретические основы рафинирования сталеплавильной ванны. - М.: Наука - 1975 - 200 с.

7.Кравец В.А. Подавление бурого дыма при переливах чугуна. Монография. – Донецк: УкрНТЭК, 2002-186 с.

Надійшла до редколегії 16.12.2008.

В. А. КРАВЕЦЬ*, **В. А. ТЕМНОХУД****

* - Донбаська національна академія архітектури і будівництва,
** - ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Експериментальне дослідження утворення бурого диму при переливах чавуну. На основі експериментальних даних запропоновано механізм утворення бурого диму при переливах рідкого чавуну з емності в емність.

бурий дим, чавун, міксер, атмосфера, кисень, метал

V. A. KRAVETS*, **V. A. TEMNOCHUD****

* - DonNABA, Makeevka
** - SHSI «Donetsk National Technical University»

Experimental Research of Red Fume Formation on Cast Iron Transfer. On the basis of experimental data the mechanism of red fume formation on cast iron transfer from vessel to vessel is proposed.

red fume, iron, mixer, atmosphere, oxygen, metal

© В. А. Кравец, В. А. Темнохуд, 2009