

С.А.Шевченко, А.Ф.Шевченко, В.И.Елисеев.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТИЦ МАГНИЯ В РАСПЛАВ ЧУГУНА ПРИ ВДУВАНИИ ЧЕРЕЗ ФУРМУ БЕЗ ИСПАРИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ НА ВЫХОДЕ

Выполнены расчетно-теоретические исследования условий внедрения частиц магния в расплав при инжектировании через погружную фурму без испарительной камеры на выходе. Показано, что частицы на момент вхождения в расплав находятся в твердом состоянии, преодолевают межфазную поверхность и внедряются в глубь расплава на 11 – 12 своих диаметров.

**Современное состояние вопроса.** Для десульфурации жидкого чугуна в большегрузных ковшах с глубиной ванны более 2,6 м, по технологии инжектирования гранулированного магния без пассивирующих добавок рационально применять фурму без испарительной камеры на выходе [1]. Первые попытки вдуть чистый магний через такие фурмы [2] сопровождались частыми случаями запечатывания канала фурмы и забивания его магнием. Было предположено, что устойчивость процесса инжектирования связана с обеспечением магниесодержащей струи достаточной кинетической энергией.

**Постановка задачи.** В рамках проводимых работ, направленных на применение фурмы без испарительной камеры на выходе для вдувания чистого магния, проведены расчетно-теоретические исследования формирования прифурменной зоны, включающие анализ условий истечения и внедрения частиц магния в расплав. Предварительно проведенные исследования теплообмена в двухфазном потоке при движении его в канале фурмы [3] нами было установлено, что гранулы магния практически не изменяют свою начальную температуру за время движения в канале фурмы. Последующее тепловое воздействие расплава на частицу магния, после выхода ее из канала фурмы, осуществляется при движении ее сквозь газовую полость (образовавшуюся в прифурменной зоне), а затем при непосредственном внедрении в расплав чугуна.

**Методика исследования.** Для оценки величины нагрева частиц во время прохождения через газовую полость за основу была принята расчетная модель теплообмена в двухфазном потоке при движении в канале фурмы [3]. В данной модели газовая полость представлена как продолжение канала фурмы длиной, соответствующей глубине проникновения газовой струи в расплав [4]. При этом температура стенки моделируемой полости принята равной температуре расплава – 1300<sup>0</sup>С. Исходные условия для расчета – размер полости и скорость истечения магниесодержащего потока, были выбраны в широких пределах и соответствовали основным параметрам инъекции гранулированного магния при процессе десульфурации перелдального чугуна в ковшах различной емкости:

- скорость истечения газа на срезе сопла изменяли в пределах 10–330 м/с, что соответствовало расходу газа 40–180 мм<sup>3</sup>/ч;
- скорость истечения частиц магния изменялась в пределах 13–143 м/с;
- глубина проникновения газовой части струи в расплав составляла 2–150 мм;
- диаметр канала изменяли в пределах 8–20 мм;
- глубина погружения фурмы составляла – 2 – 4 м;

**Изложение основных материалов исследования.** Проведенный по данной модели расчетный анализ показал, что движущаяся в газовой полости частица магния, диаметром 1,6 мм, нагревается максимально на 10<sup>0</sup>С. Такой нагрев можно считать незначительным и поэтому частицы магния перед внедрением в расплав чугуна находятся в холодном твёрдом состоянии. Оценка глубины проникновения частиц магния в расплав включала определение длины пути внедрения частиц в жидкий чугун, начиная с поверхности раздела «газовая полость – расплав» в прифурменной зоне. Для определения предельных потенциальных возможностей этого процесса в расчёте принято, что испарение частицы не влияет на динамику ее движения в расплаве.

Реальный процесс внедрения частицы в расплав описать сложно. Прежде чем внедриться в расплав чугуна частица магния должна преодолеть силы поверхностного натяжения. Трудно в полном объеме оценить влияние вязкости металла в зоне внедрения, к тому же, этот процесс может сопровождаться образованием на поверхности каверны, при «схлопывании» которой за частицей должен увлечься пузырёк газа. Математическое решение этой задачи в полном объёме в настоящее время является практически невозможным ввиду отсутствия достоверных исходных данных и числовых значений ряда параметров. Поэтому задача решалась в несколько упрощенном виде – при внедрении частицы без процессов «схлопывания» после кавернообразования. В этом случае процесс изменения скорости частицы за счёт преодоления поверхностного натяжения может быть оценен по аналитическому выражению [6]:

$$W_{\tau}^i = \sqrt{W_{\tau}^{0^2} - \frac{2\sigma_{\text{м}}}{\rho_{\tau} \cdot d_{\tau}}} \quad (1)$$

где  $W_{\tau}^0$ ,  $W_{\tau}^i$  – начальная и текущая скорости твёрдой частицы магния соответственно;  $\sigma_{\text{м}}$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла;  $d_{\tau}$ ,  $\rho_{\tau}$  – диаметр и плотность частицы соответственно.

Расчётная оценка по выражению (1) показала незначительное влияние силы поверхностного натяжения на изменение скорости движения частицы – не более 1% для исследуемых диапазонов скоростей частиц (10–150м/с) и их диаметров (0,5 – 1,6 мм).

Дальнейшее движение частицы в расплаве может быть описано уравнением (2), которое скомпоновано нами для условий вертикального, дви-

жения частицы сверху вниз с заданной начальной скоростью  $W_T^i$  вплоть до полной остановки частицы:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\left(\rho_T + \frac{1}{2}\rho_M\right) \cdot W_T \frac{dW_T}{dx} = -\frac{1}{2}\pi r^2 \cdot C_\mu \cdot \rho_M \cdot W_T^2 + \frac{3}{4}\pi r^3 \cdot g(\rho_T - \rho_M) \quad (2)$$

где  $\rho_M$  – плотность металла  $C_\mu$  – коэффициент гидродинамического сопротивления сферы в потоке.

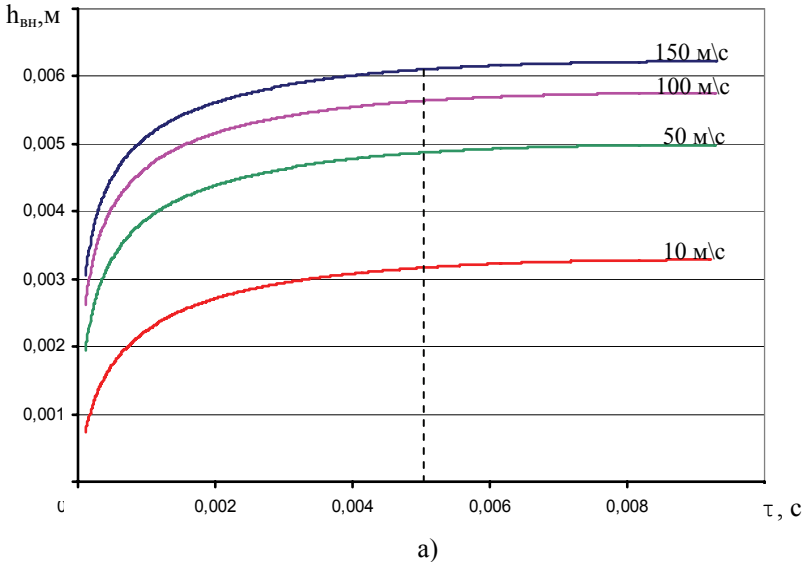
Согласно принятой модели, по которой скомпоновано данное выражение, движению частицы в расплаве чугуна вертикально вниз противостоят силы Архимеда, присоединённой массы и гидродинамического сопротивления.

Для оценки максимально возможной глубины внедрения частиц магния в расплав по уравнению (2) выполнены расчёты глубины внедрения ( $h_{вн}$ ) частиц магния диаметром в пределах 0,5 – 1,6 мм при различной начальной скорости истечения частиц (10–150 м/с). Глубину внедрения частиц магния в расплав чугуна (после их внедрения) оценивали как в абсолютной величине (метрах) так и в относительном виде, т.е. отношение абсолютной глубины внедрения ( $h_{вн}$ ) к диаметру частицы ( $d_i$ ). Результаты расчёта для наименьшего (0,5 мм) и наибольшего (1,6 мм) применяемых диаметров частиц представлены на рис.1, из которого видим, что глубина внедрения частиц магния в расплав и продолжительность их движения в расплаве зависят от скорости движения частиц и их диаметра. Максимальный прирост глубины внедрения частиц в расплав происходит на первых 0,002–0,005 секундах движения частиц в расплаве. Предельная величина глубины внедрения достигается через 0,006–0,008 с движения частиц магния диаметром 0,5 мм и 0,015–0,020 с при диаметре частиц 1,5мм.

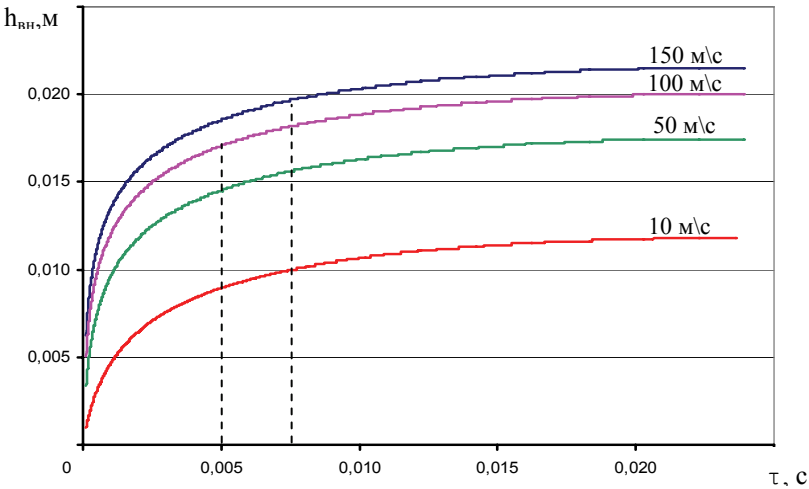
Существенным действенным фактором увеличения глубины внедрения частиц магния в расплав является увеличение скорости до 100 – 150 м/с (рис.1 и рис.2). из полученных диаграмм видим, что вполне реально при скорости более 70–80 м/с обеспечение глубины внедрения частиц магния в расплав чугуна вплоть до 0,02 м или около 12 диаметров частиц.

Таким образом, можно сделать вывод в том, что при скорости движения частиц 80м/с и больше, частицы магния устойчиво внедряются в жидкий чугун на глубину около 12 своих диаметров за время 0,006–0,020с. Расчёты подтверждают возможность преодоления частицами межфазной поверхности в прифурменной зоне и дальнейшего внедрения частиц в расплав чугуна на глубину около 12 диаметров частиц (отделяясь от газовой фазы потока). Этим создаются благоприятные предпосылки протекания обменных процессов в объеме чугуна.

Полученные фактические данные и закономерности рационально использовать при выборе параметров вдувания магния в жидкий чугун и расчетов тепло-массообменных процессов при инъекционном методе ввода магния в чугун.



а)



б)

Рис.1. Зависимость глубины внедрения ( $h_{\text{вн}}$ ) частицы магния в расплав чугуна от: времени ( $\tau$ ) движения в расплаве. Цифры у кривых – начальная скорость движения частицы (скорость истечения из канала фурмы): а) диаметр частицы 0,5 мм; б) диаметр частицы 1,6 мм.

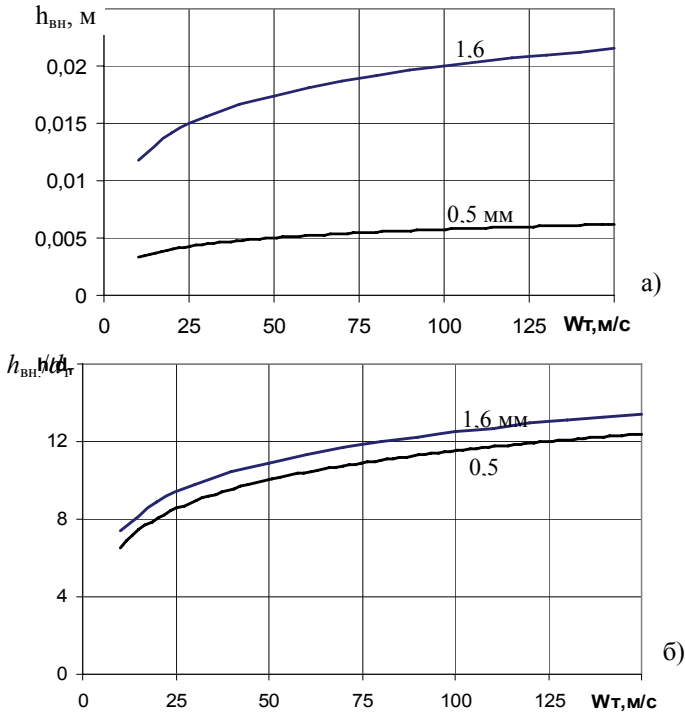


Рис.2. Зависимость абсолютной –  $h_{вн}$ . (а), и относительной -  $h_{вн}/d_t$  (б), глубины внедрения гранул магния в расплав чугуна от скорости частиц. Цифры у кривых – диаметр частиц.

1. *Процесс* особо глубокой десульфурации чугуна вдуванием магния в условиях крупнопромышленного производства стали. / А.Ф.Шевченко, А.С.Вергун, А.С.Булахтин и др. // *Металл и литье Украины*, 2006. – № 1. – С. 84–89.
2. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. М. *Металлургия*, 1980. – 238с.
3. *Оценка* скорости истечения магниесодержащей струи при варьировании условий и параметров инжестирования / С.А.Шевченко, В.И.Елисеев, А.Ф.Шевченко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ, вып.12. – 2006.– С. 118–122.
4. *Оценка* параметров проникновения истекающей из фурмы магниесодержащей струи в расплав чугуна. / С.А.Шевченко, А.Ф.Шевченко, В.И.Елисеев и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. тр. ИЧМ, вып.13. – 2006.– С. 48–51.
5. *Шевченко А.Ф.* Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. // Докт. диссерт., 1997. Днепропетровск. 426 с.
6. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. // М.: Наука, т.1, 1987. – 464 с.

*Статья рекомендована к печати докт.техн.наук А.С.Вергуном*