

УДК 669.184.244.22:669.14.541.64

**В. С. ЖИВЧЕНКО<sup>а</sup>, С. А. ФРОЛОВА<sup>б</sup>, Р. А. КАНИЩЕВ<sup>с</sup>, О. М. ФРОЛОВА<sup>с</sup>**

<sup>а</sup> GmbH «Swiss Steel Fire GmbH», Цюрих, Швейцарія, <sup>б</sup> Донбасская національная академия строительства и архитектуры, <sup>с</sup> Технический университет Кошице, Словакия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

В данной статье приведены результаты физического моделирования процессов гидродинамики при продувке жидкого металла через пористые вставки (пробки) и продувочные устройства в электродуговых печах. Исследования показали, что локальные продувочные устройства (пробки) не могут осуществлять объемные циркуляционные потоки, т. к. в межэлектродном пространстве возникает застойная зона. С целью предотвращения застойных зон в объеме расплава предложена продувка расплава с помощью строчечно-капиллярных секций, обеспечивающих объемное перемешивание в мелкопузырьковом режиме (шлейфовая продувка расплава – ШПР). При таком способе обработки жидкого металла существенно увеличивается скорость процессов, протекающих в расплаве, что снижает время плавки.

**электродуговая печь, продувка, расплав, пористые пробки, продувочные устройства, мелкопузырьковый шлейфовый режим, нисходящий и восходящий поток, подэлектродная зона, двухконтурное движение**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основным недостатком плавильных печей с верхним нагревом является противоречие между тепло- и массопереносом в расплаве, что влечет за собой не только энергетические, но и экономические потери: снижение производительности печи из-за длительности плавки в окислительные и восстановительные периоды, увеличивается расход электроэнергии, электродов в дуговых печах, газообразного топлива в пламенных печах, огнеупоров и т. д. Поэтому во всех странах, имеющих металлургическое производство, проводятся работы по конструктивному усовершенствованию плавильных печей с верхним нагревом. Особенно остро эта проблема стоит при эксплуатации электродуговых печей.

Широкое применение на многих металлургических предприятия в технически развитых странах [1] получила конструкция дуговой сталеплавильной печи, у которой для интенсификации перемешивания с целью гомогенизации расплава для улучшения контроля химического состава и эффективности передачи энергии предусмотрена продувка ванны снизу через подину через три пробки с направленной пористостью. Эти пробки расположены между каждым из трех электродов по окружности, вдвое большей, чем диаметр электродов. Следует отметить, что такая подача газа имеет локальное воздействие с присущими ей недостатками. Многочисленные публикации [1–4] по данному вопросу показали, что высокие локальные скорости подъема расплава над пробкой приводят к снижению срока службы подины при повышенном расходе огнеупоров.

Для исследования гидродинамики внепечной обработки широко используются водяные модели [5, 6, 7]. В экспериментах на моделях используют метод ввода индикатора, который позволяет быстро получить требуемую информацию по распределению времени пребывания в системе, а также различные методы исследования поля скоростей. Таким путем легко определяются условия, приводящие к возникновению коротких контуров циркуляции, оцениваются объемы «мертвых» зон, исследуется распределение потоков газа по времени пребывания, рациональное положение продувочного устройства относительно центра сечения ковша т. п.

С целью установки траектории движения потоков было проведено физическое моделирование для электродуговых печей. При выборе модели продувочного устройства, а также критериев подобия

образца и модели определились с параметрами, влияющими на гидродинамику: скорость подъема газовых пузырей в жидкости  $\omega$ ; плотность жидкости  $\rho$ ; диаметр газовых пузырей  $d$ ; поверхностное натяжение газ-жидкость  $\sigma$ ; вязкость жидкости  $\nu$ ; ускорение свободного падения  $g$ ; характерный размер  $L$ . Эти параметры входят в гидродинамические критерии Рейнольдса, Вебера и Фруда:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (1)$$

$$We = \rho \omega^2 L / \sigma, \quad (2)$$

$$Fr = \frac{\omega^2}{gd}. \quad (3)$$

Следовательно, стационарный процесс продувки стали в ковше газом с целью рафинирования может быть выражен зависимостью  $\varepsilon = f(We; Fr; Re)$ .

Из равенства критерия  $We$  (2) на образце и модели можно произвести расчет масштаба модели. Данные, используемые при моделировании, приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Исходные данные для расчета модели [5]

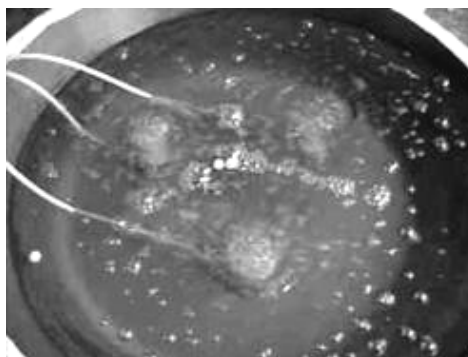
Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma$ , н/м <sup>2</sup>	$D$ , м	$\omega$ , м/с	Высота расплава $L$ , м
Расплав	6 900	$0,8 \times 10^{-5}$	1,8600	$0,15 \div 0,3$	0,22	2,7
Вода	1 200	$1,0 \times 10^{-6}$	0,0723	0,04; 0,05; 0,10	0,22	

Взяв из таблицы значения, определим критерий Вебера для образца  $We_o$ :

$$We_o = \frac{\rho \omega^2 L}{\sigma} = \frac{6\,900 \cdot 0,22^2 \cdot 2,7}{1,86} = 487,8. \quad (4)$$

Приравняв критерии Вебера для модели  $We_m$  и образца  $We_o$ , получим значение высоты расплава  $L$  на модели  $L = 0,7$  м. Т. о. по отношению высот расплавов образца и модели получим масштаб модели 1:3,86 ( $2,7/0,7 = 3,86$ ).

Моделирование процесса гидродинамики с использованием трех продувочных пробок показало, что при установке продувочных элементов симметрично оси подины по окружности образуется двух-контурное движение потоков, при котором внешний контур движется к периферии. При этом объем расплава над пробкой поднимается вверх, прижимаясь к краю, и по подине скользит вниз к продувочному элементу. Таким образом, внешний контур циркуляции замыкается. Во внутреннем контуре потоки сталкиваются в центральной части ванны, где происходит их взаимное торможение, образуя застойную зону с нулевой скоростью. Поэтому на всех горизонтальных сечениях расплава температурные поля с максимальными температурами располагаются в зоне распада электродов. Следовательно, локальные продувочные устройства не могут осуществлять объемные циркуляционные потоки. Так, на рис. 1 видна застойная зона в центральной части ванны, внутренний циркуляционный контур и периферийные циркуляционные потоки внешнего контура.



**Рисунок 1** – Моделирование процесса продувки в электродуговой печи с помощью продувочных пробок.

Таким образом, с точки зрения гидродинамики эффективность такого способа продувки с целью перемешивания незначительная.

Площадь продувочного устройства является одним из важнейших условий для эффективного воздействия на расплав. При подаче газа через пористые вставки с небольшой площадью (рабочий диаметр пробки не более 100 мм, площадь соответственно равна 7 850 мм<sup>2</sup>) теплообменные процессы протекают по периферии газового потока. При этом скорость центральных потоков выше на порядок [8]. Не принимая участия в процессах, он выходит на поверхность жидкой ванны с образованием буруна. Таким образом, с точки зрения гидродинамики эффективность такого способа продувки с целью перемешивания незначительная.

Из выше приведенного можно сделать вывод, что с целью предотвращения застойных зон в объеме расплава необходимо продувочное устройство устанавливать по центру подины, режим продувки должен быть объемный и мелкопузырьковый. Такой режим осуществим при использовании технологии шлейфовой продувки расплава (ШПР).

ШПР производится через продувочные устройства в виде строчечно-капиллярных секций [9–11]. Так в строчечно-капиллярных секциях продувочные зоны выполнены в виде капилляров расположенных в одну линию – строчку. Расстояние между строчками 20÷40 мм, что предотвращает слияние выходящего газа в сплошной грибообразный пузырь, следовательно, продувка протекает в мелкопузырьковом режиме, при этом площадь взаимодействия расплава и газа возрастает в десятки тысяч раз.

Установка продувочного устройства в корне меняет вид газового потока и процессы, которые при этом протекают: холодные придонные объемы расплава, поднимаясь вверх, внедряются в центр горячего объема и симметрично перемещают его к более холодной периферии. Затем, остывая, опускаются вниз к центру к продувочному устройству, вновь поднимаются вверх и цикл повторяется. То есть, в объеме жидкой ванны отсутствуют застойные зоны, следовательно, процессы гомогенизации протекают значительно эффективней. На рис. 2 приведена фотография физического моделирования процесса продувки в электродуговой печи с помощью продувочного устройства в виде строчечно-капиллярных секций, на котором видно равномерное движение жидкости без застойных зон.



**Рисунок 2** – Моделирование процесса продувки в электродуговой печи с помощью продувочного устройства в виде строчечно-капиллярных секций.

Использование строчечно-капиллярных секций способствовало получению мелкопузырькового газового потока, разделенного на отдельные шлейфы, при такой структуре газового потока химические реакции взаимодействия жидкости и газовой фазы протекают на некотором расстоянии от поверхности секции. Этот фактор дает возможность производить продувку расплава окислительным газом (углекислый газ, воздух, смесь аргона с кислородом, а также чистым кислородом) без риска прогара продувочного устройства. Это дает возможность проводить операцию продувки расплава кислородом в любое технологически необходимое время без опаски заметалливания сопел продувочного устройства. Кроме того, подача кислорода в мелкопузырьковом шлейфовом режиме значительно повышает эффективность продувки по двум факторам: площадь массообмена увеличена в тысячи раз, и настолько же увеличена площадь теплопереноса. Следовательно, происходит объемный нагрев расплава. При таком процессе теплообмена отсутствуют перегретые зоны и, как следствие, угар металла. Отпадает необходимость в дополнительной установке кислородной фурмы и постоянной подачи газа.

Исследования как на холодных моделях, так и натурные испытания при выплавке стали на двух- и пятитонных электродуговых печах показали, что при таком способе обработки жидкого металла

скорість процесів суттєво збільшується. Реальне час виплавки і доводки сталей до заданого хімічного складу і температури скорочується в два рази. Крім того, знижується вміст розчинених газів (водород, азот, кислород), неметалічних включень.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Риччи, М. Оптимізація донного перемішування в 165-т електродугової печі фірми «ArcelorMittal Dofako» [Текст] / М. Риччи, С. Вотерфул, С. Сан // Сталь. – 2009. – № 6. – С. 29–34.
2. Guo, D. C. Developments in Modelling of Gas Injection and Slag Foaming [Текст] / D. C. Guo, L. Gu, G. A. Irons // Applied Mathematical Modelling. – 2002. – Vol. 26. – P. 263–280.
3. Gu, L. Physical and Mathematical Modeling of Bottom Stirring and Gas Evolution in Electric Arc Furnaces [Текст] / L. Gu, G. A. Irons // Iron & Steelmaker. – 2001. – Vol. 28, N 1. – P. 57–68.
4. Изучение методов моделирования возможностей повышения эффективности использования установок ковш-печь [Текст] / В. П. Пишпюк, В. Ф. Поляков, Э. В. Приходько [и др.] // Труды десятого конгресса сталеплавильщиков / Под редакцией Чернова А. А. – Москва : Металлургиздат, 2008. – С. 539–545.
5. Яковлев, Ю. Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов [Текст] / Ю. Н. Яковлев // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства : Сборник науч. трудов ММИ / Мариупольский Металлургический Институт. – М. : Металлургия, 1991. – С. 32–44.
6. Suvankar, Ganguly. Numerical Investigation on Role of Bottom Gas Stirring in Controlling Thermal Stratification in Steel Ladles [Текст] / Ganguly Suvankar, Suman Chakraborty // ISIJ International. – 2004. – Vol. 44, N 3. – P. 537–546.
7. Живченко, В. С. Моделирование турбулентных потоков в барботируемом ковше [Текст] / В. С. Живченко, С. А. Фролова // Сталь. – Москва, 2010. – № 12. – С. 27–30.
8. Гиазатулин, Р. А. Исследование механизма обработки стали газосходящими потоками при барботировании ванны нейтральным газом [Текст] / Р. А. Гиазатулин // Труды шестого конгресса сталеплавильщиков / Под редакцией Чернова А. А. – Москва : Металлургиздат, 2001. – С. 321–323.
9. Живченко, В. С. Гомогенизация и рафинирование стали продувкой аргоном в шлейфовом мелкопузырьковом режиме [Текст] / В. С. Живченко, А. И. Троцан, С. А. Фролова // Черная металлургия : Бюллетень научнотехнической и экономической информации. – Москва, 2008. – № 2(1298). – С. 70–76.
10. Живченко, В. С. Влияние технологии шлейфовой продувки металла на его вязкостные свойства [Текст] / В. С. Живченко, С. А. Фролова // Сталь. – Москва, 2010. – № 4. – С. 35–37.
11. Живченко, В. С. Влияние технологических факторов внепечного рафинирования на степень усвоения наполнителей в порошковой проволоке [Текст] / В. С. Живченко, С. А. Фролова // Сталь. – Москва, 2008. – № 4. – С. 14–16.

Получено 20.05.2013

#### В. С. ЖИВЧЕНКО <sup>a</sup>, С. О. ФРОЛОВА <sup>b</sup>, Р. О. КАНІЩЕВ <sup>c</sup>, О. М. ФРОЛОВА <sup>c</sup> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУВКИ РОЗПЛАВУ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ

<sup>a</sup> GmbH «Swiss Steel Fire GmbH» Цюрих, Швейцарія, <sup>b</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури, <sup>c</sup> Технічний університет, Кошице, Словаччина

У даній статті наведені результати фізичного моделювання процесів гідродинаміки при продувці рідкого металу через пористі вставки (пробки) і продувні пристрої в електродугових печах. Дослідження показали, що локальні продувні пристрої (пробки) не можуть здійснювати об'ємні циркуляційні потоки, тому що в міжелектродному просторі виникає застійна зона. З метою запобігання застійних зон в об'ємі розплаву запропонована продувка розплаву за допомогою рядково-капілярних секцій, що забезпечують об'ємне перемішування в дрібнопухирцевому режимі (шлейфова продувка – ШПР). Установлено, що цей продувний пристрій докорінно змінює вид газового потоку. При такому способі обробки рідкого металу суттєво збільшується швидкість процесів, що протікають у розплаві, що знижує час плавки.

**електродугова піч, продувка, розплав, пористі пробки, продувні пристрої, дрібнопухирцевий шлейфовий режим, низхідний потік, висхідний потік, піделектродна зона, двоконтурний рух**

VLADIMIR ZHIVCHENKO <sup>a</sup>, SVETLANA FROLOVA <sup>b</sup>, RUSLAN KANISHCHEV <sup>c</sup>,  
OLGA FROLOVA <sup>c</sup>

MODELING OF MELT EXPULSION IN ARC FURNACES

<sup>a</sup> GmbH «Swiss Steel Fire GmbH», Zurich, Switzerland, <sup>b</sup> Donbas National Academy of  
Civil Engineering and Architecture, <sup>c</sup> The Technical University of Košice, Slovakia

This paper has presented the results of physical modeling of hydrodynamic processes at expulsion of liquid metal through porous inserts (plugs) and blowing-off devices in arc furnaces. Researches have showed that local blowing-off devices (plugs) can't carry out volume circulating streams because of a stagnant zone in interelectrode space. To avoid stagnant zones in volume of melt it has been offered the melt expulsion by means of the line-capillary sections providing volume hashing in a small-bubble mode (a plume expulsion of melt – PEM). At such way of processing of liquid metal the speed of the processes proceeding in melt significantly increases melting time reduces.

**the arc furnace, expulsion, melt, porous plugs, blowing-off devices, the small-bubble plume mode, descending and ascending stream, subelectrode zone, double-circuit movement**

**Живченко Володимир Семенович** – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора по інноваціях фірми GmbH «Swiss Steel Fire GmbH», Цюрих, Швейцарія. Наукові інтереси: рафінування металевих розплавів.

**Фролова Світлана Олександрівна** – кандидат хімічних наук, доцент кафедри фізики і фізичного матеріалознавства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: кінетика кристалізації розплавів, дослідження гідродинаміки рідких середовищ.

**Канищев Руслан Олександрович** – аспірант кафедри металевих конструкцій будівельного факультету Технічного університету, м. Кошице, Словаччина. Наукові інтереси: кристалізація металевих розплавів.

**Фролова Ольга Михайлівна** – аспірант кафедри геотехніки будівельного факультету Технічного університету, м. Кошице, Словаччина. Наукові інтереси: технології одержання якісних матеріалів.

**Живченко Владимир Семенович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по инновациям фирмы GmbH «Swiss Steel Fire GmbH», Цюрих, Швейцария. Научные интересы: рафинирование металлических расплавов.

**Фролова Светлана Александровна** – кандидат химических наук, доцент кафедры физики и физического материаловедения Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: кинетика кристаллизации расплавов, исследование гидродинамики жидких сред.

**Канищев Руслан Александрович** – аспирант кафедры металлических конструкций строительного факультета Технического университета, г. Кошице, Словакия. Научные интересы: кристаллизация металлических расплавов.

**Фролова Ольга Михайловна** – аспирант кафедры геотехники строительного факультета Технического университета, г. Кошице, Словакия. Научные интересы: технологии получения качественных материалов.

**Zhivchenko Vladimir** – PhD (Eng.), the Associate Professor, the deputy director for GmbH «Swiss Steel Fire GmbH» firm innovations, Zurich, Switzerland. Scientific interests: refinement of metal melts.

**Frolova Svetlana** – PhD (Chem. Sc.), the Associate Professor, Physics and Material Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: kinetics of crystallization of melts, research of hydrodynamics of liquid environments.

**Kanishchev Ruslan** – post-graduate student of Metal Designs Department of Construction Faculty of The Technical University of Košice, Slovakia. Scientific interests: crystallization of melt metal.

**Frolova Olga** – post-graduate student of Geotekhnika Department of Construction Faculty of The Technical University of Košice, Slovakia. Scientific interests: technologies of receiving qualitative materials.