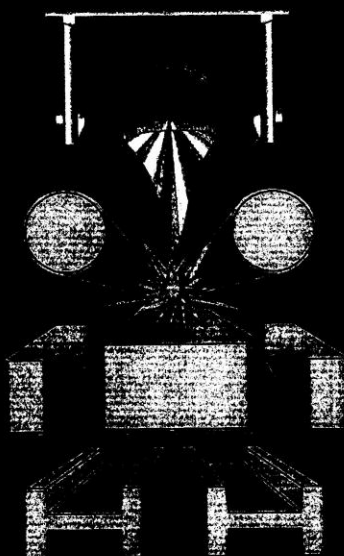


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**Донецкий национальный технический университет**

**ТРУДЫ  
3-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ**

*(г. Донецк, 31 октября - 02 ноября 2006 г.)*



**85-летию  
Донецкого НТУ**

**ПОСВЯЩЕНО**

**15-летию  
НПО "Доникс"**



**Донецк - 2007**

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУВКИ МЕТАЛЛА В КОВШЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ АГРЕГАТА КОВШ-ПЕЧЬ

А.Н.Смирнов, Е.В.Ошовская, И.Н.Салмаш И.Н. (Донецкий национальный технический университет)

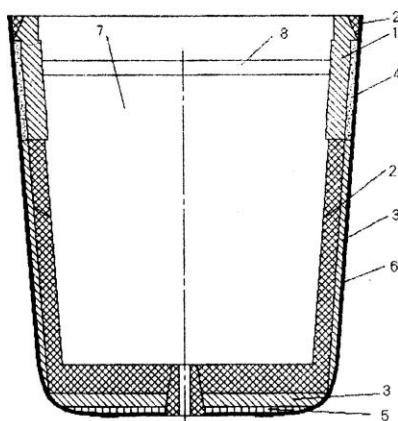
В настоящее время в ковшовой металлургии актуальной является проблема сокращения ресурсов при сохранении качества выплавляемой стали. Данное требование относится и к минимизации объемов инертного газа, используемого для перемешивания расплава в агрегате ковш-печь. В результате перемешивания требуется не только обеспечить необходимую степень гомогенизации расплава по температуре и химическому составу, но и оптимально использовать объем вдуваемого газа. Эта цель достигается путем применения рациональных режимов продувки, например, импульсных. Продувка в импульсном режиме подразумевает следующий принцип: интервалы вдувания газа, отличающиеся расходом и длительностью, чередуются с интервалами без подачи вдувания газа, на протяжении которых перемешивание расплава осуществляется за счет энергии газа накопленной жидкой системой на предыдущем интервале.

Широкое применение импульсных режимов продувки сдерживает отсутствие четких рекомендаций по их параметрам, которые должны учитывать конструктивные особенности агрегата ковш-печь и технологические условия конкретного производства. Обосновать параметры продувки в импульсном режиме, т.е. количество импульсов, длительность интервалов вдувания газа, расходы газа, возможно на имитационных моделях процесса перемешивания расплава в ковше. Для разработки и реализации данных моделей широко используются CFD технологии, т.е. прикладные пакеты программ, выполняющие компьютерное моделирование гидродинамических процессов. В данной статье представлены результаты поиска оптимальных параметров продувки металла в сталеразливочном ковше агрегата ковш-печь при решении задачи температурной гомогенизации расплава.

Исследования выполнялись для сталеразливочного ковша вместимостью 130 т с одним центрально расположенным продувочным отверстием (рис.1) на математической модели с использованием прикладного пакета ANSYS (модуль Flotran) [1]. В ходе моделирования изучалось влияние различных схем продувки на гомогенизация расплава по температуре. Необходимо отметить, что в этом случае можно рассматривать следующие постановки задач оптимизации.

1. За заданный интервал времени  $\tau_s$  достичь необходимую степень температурной однородности расплава при минимальном суммарном расходе газа  $Q_s$ . Однородность по температуре расплава оценивается максимальным перепадом температуры  $\Delta T$  по объему  $V$  жидкого металла, который не должен превышать допускаемой величины  $\Delta T_d$ :

$$\begin{cases} Q_s(\tau_s) \rightarrow \min, \\ \Delta T_V \leq \Delta T_d. \end{cases} \quad (1)$$



- 1 – периклазоуглеродистые огнеупоры шлакового пояса;
- 2 – корундошпинельный тиксотропный бетон;
- 3 – муллитокорундовые огнеупоры арматурного слоя;
- 4 – периклазохромитовые огнеупоры арматурного слоя шлакового пояса;
- 5 – кварцевый бетон; 6 – стальной кожух; 7 – жидкая сталь; 8 – шлак

Рисунок 1. Схема сталеразливочного ковша вместимостью 130 т с одним продувочным отверстием:

2. За минимально возможное время достичь необходимую степень температурной однородности расплава при использовании допустимого объема газа  $Q_d$ :

$$\begin{cases} \tau \rightarrow \min, \\ Q_{\Sigma}(\tau) \leq Q_d \\ \Delta T \leq \Delta T_d. \end{cases} \quad (2)$$

Решение указанных задач возможно методами комбинаторики, путем перебора технологически возможных вариантов продувки, с учетом принятого критерия оптимизации. Минимальный расход вдуваемого газа следует назначать из условия отсутствия заметалливания продувочного отверстия, предельно возможный расход газа можно определить по формуле Сано [2, 3] из условия обеспечения допробойного режима продувки:

$$Q_{пр} = \sqrt{\frac{H\rho_m d_o^2}{0,18\rho_r}}, \quad (3)$$

где  $H$  – высота металла в ковше;  $\rho_m$  – плотность металла;  $d_o$  – диаметр отверстия продувочного устройства;  $\rho_r$  – плотность вдуваемого газа.

Максимальная длительность интервала вдувания газа определяется путем сопоставления минимальной текущей температуры расплава с допусаемым уровнем, при достижении которого следует прекратить продувку и выдержать время паузы, в течение которой происходит выравнивание температуры по всему расплаву. Далее если требуемая степень температурной однородности не достигнута назначается следующий интервал вдувания газа.

В процессе моделирования авторами статьи рассмотрено четыре различных варианта продувки в импульсном режиме, схемы которых представлены на рис.2. Варианты различаются продолжительностью, числом ступеней и расходом вдуваемого газа. Сравнение эффективности использования импульсных режимов продувки выполнялось с вариантом, соответствующим непрерывному режиму (рис.2а). Характеристика рассмотренных вариантов продувки приведена в таблице.

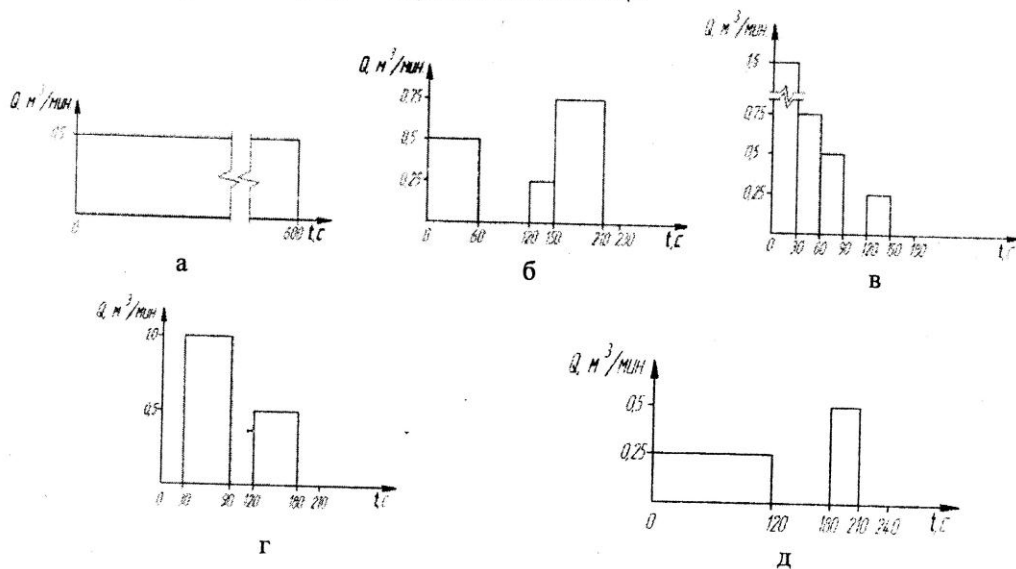


Рисунок 2. Схемы вариантов продувки: а) базовый непрерывный (режим 0); б, в, г, д) импульсные (режим 1, 2, 3, 4)

Таблица 1. Характеристика вариантов продувки

Номер режима (см. рис.2)	Число интервалов вдувания газа	Максимальный расход газа, м <sup>3</sup> /мин.	Суммарный объем газа, м <sup>3</sup>	Длительность процесса продувки, мин
0	1	0,5	5	10
1	3	0,75	1,375	3,8
2	4	1,5	1,5	3
3	2	1	1,5	3,5
4	2	0,5	0,75	4

В результате моделирования для каждого варианта продувки были получены качественные картины движения потоков расплава и распределения температур, а также их количественные оценки. Поля скоростей при использовании непрерывного режима (режим 0) приведены в [1]. На рис.3 показаны характерные поля скоростей движения металла в ковше при использовании импульсного режима продувки (режим 2, рис.2,б) для различных моментов времени, соответствующих интервалам вдувания газа и пауз. Из представленных картин видно следующее. При вдувании газа на первом интервале с расходом 1,5 м<sup>3</sup>/мин в ковше образуются две зоны циркуляции, охватывающие практически весь объем расплава, хотя в левой придонной части скорости движения металла

невелики (рис. 3а).

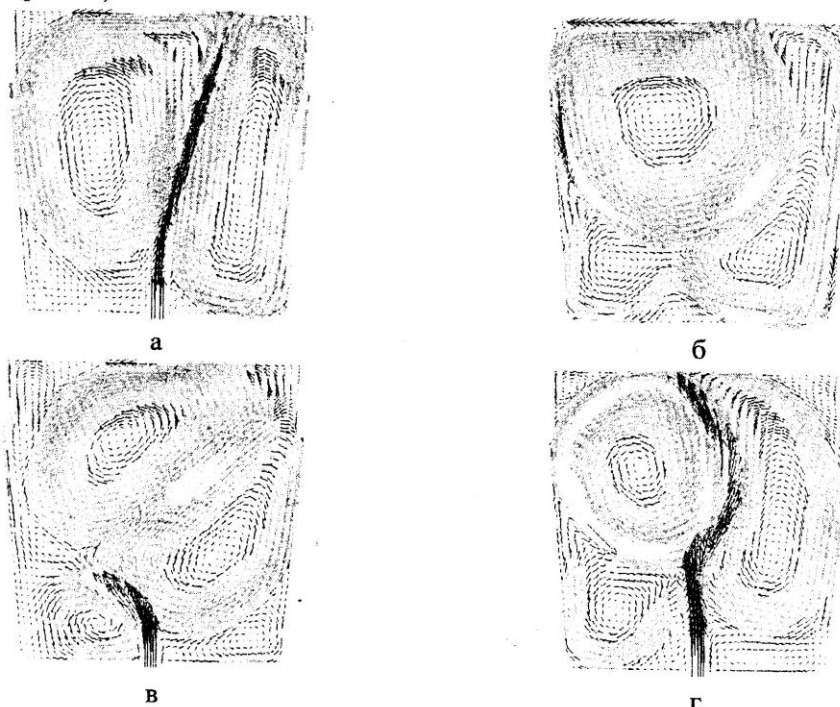


Рисунок 3. Поля скоростей движения расплава для импульсного режима 2 в разные моменты времени: а) 20 с; б) 95 с; в) 125 с; г) 150 с.

Далее по ходу продувки расход газа снижается до  $0,5 \text{ м}^3/\text{мин.}$ , при этом скорость движения расплава в зонах циркуляции уменьшается, но в пределах каждой зоны перепад скоростей уменьшается. На интервале отсутствия вдувания газа расплав движется по инерции. В объеме металла выделяются три зоны циркуляции (рис. 3б) – в правой части ковша по всей его высоте; центральная, занимающая половину объема, и мало-скоростная в левой придонной части ковша. На протяжении интервала паузы эти зоны несколько перераспределяются в объеме металла, изменяя местоположение и форму, скорости движения расплава в них снижаются. Это приводит к тому, что при вдувании газа на следующем интервале обработки газожидкостный поток несколько затормаживается и отклоняется влево существующими в расплаве циркуляционными потоками (рис. 3в). При продолжении продувки восходящий поток достигает верхнего уровня расплава и в металле образуются три новые зоны циркуляции (рис. 3г). После прекращения подачи газа эти зоны в ковше остаются, но скорости движения потоков в них выравниваются.

Оценка степени температурной однородности расплава выполнялась визуально на основе картин распределения температуры, а также количественно на разных высотных уровнях расплава (см. рис. 1), отвечающих характерным зонам ковша (возле днища, средняя часть ковша, верхняя часть рабочей зоны, зона шлакового пояса). На каждом из уровней оценивалось изменение температуры по диаметру ковша во времени, при этом использовалось отношение текущего значения к начальному значению температуры в рассматриваемой точке. Полученные результаты представлены на рис. 4 – 7.

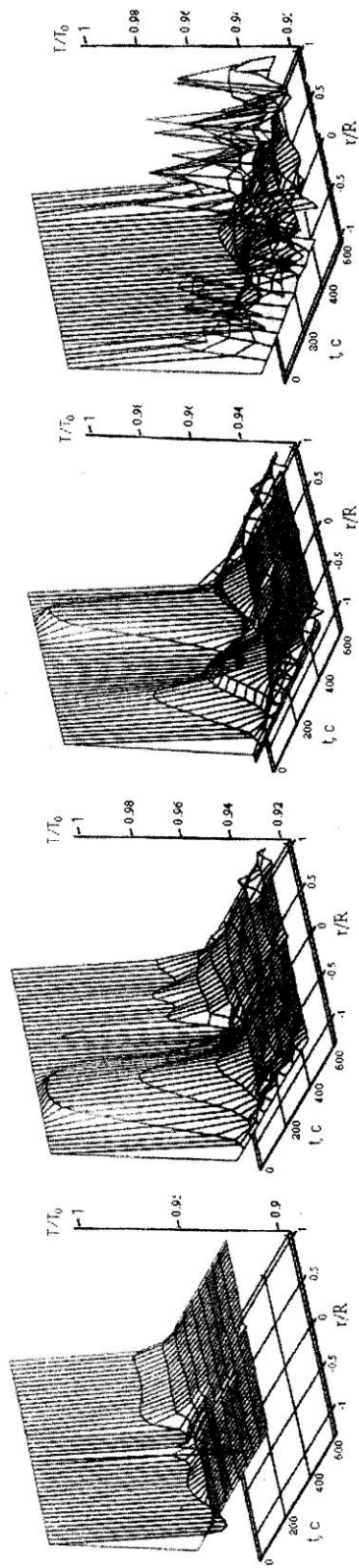


Рисунок 4. Графики изменения температуры расплава в процессе продувки (непрерывный режим продувки, схема 0) по диаметру ковша на разных высотных уровнях: а) 0,65 м; б) 1,7 м; в) 2,8 м; г) 3,4 м

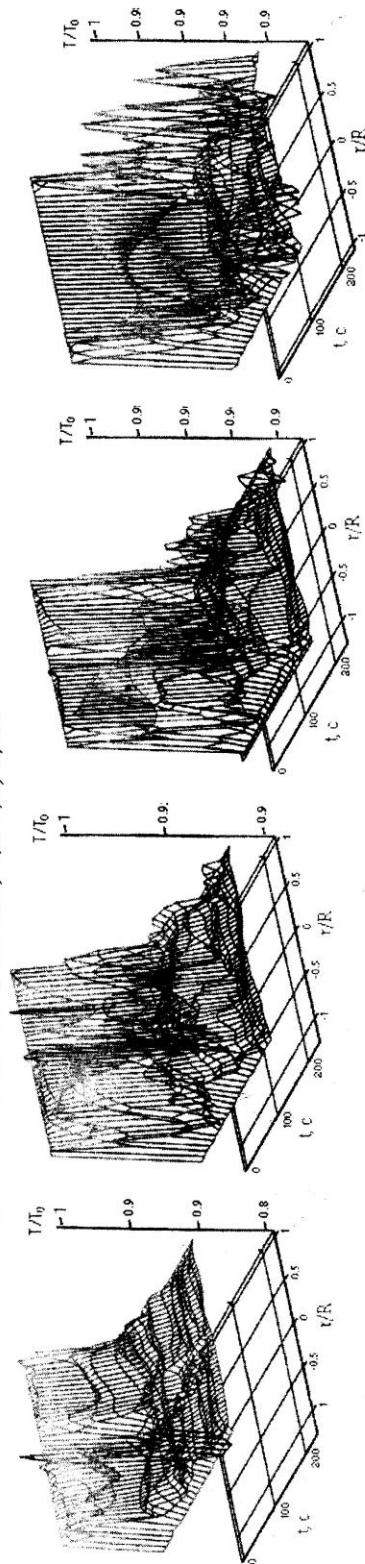
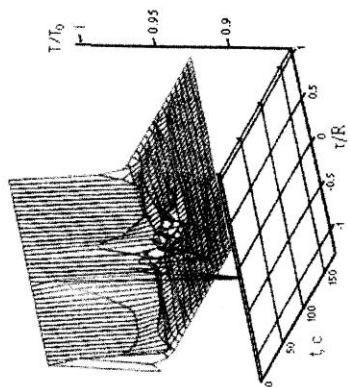
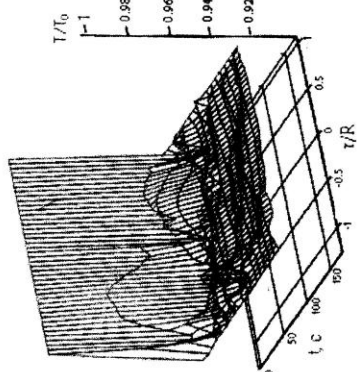


Рисунок 5. Графики изменения температуры расплава в процессе продувки (импульсный режим продувки, схема 1) по диаметру ковша на разных высотных уровнях: а) 0,65 м; б) 1,7 м; в) 2,8 м; г) 3,4 м

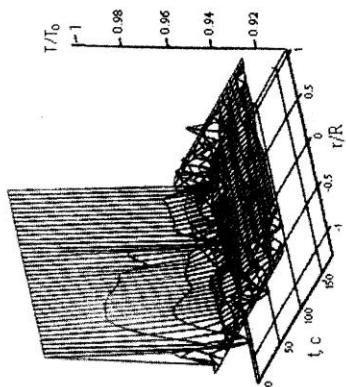




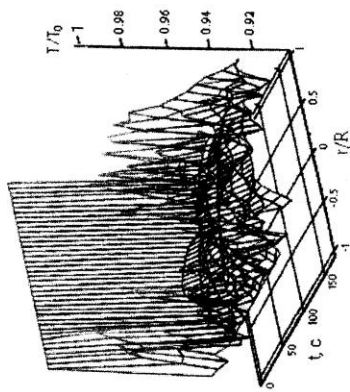
а



б

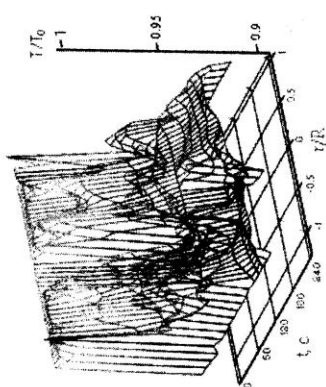


в

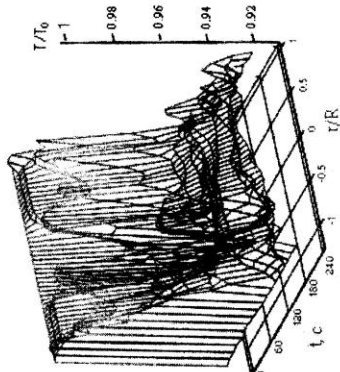


г

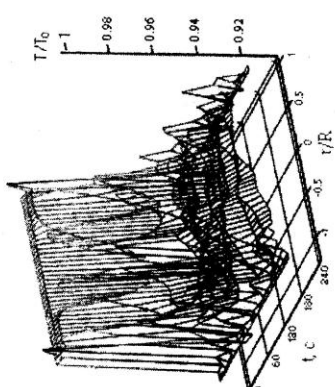
Рис. 6. Графики изменения температуры расплава в процессе продувки (импульсный режим продувки, схема 2) по диаметру ковша на разных высотных уровнях: а) 0,65 м; б) 1,7 м; в) 2,8 м; г) 3,4 м



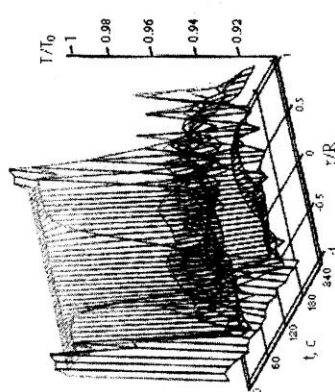
а



б



в



г

Рисунок 7. Графики изменения температуры расплава в процессе продувки (импульсный режим продувки, схема 4) по диаметру ковша на разных высотных уровнях: а) 0,65 м; б) 1,7 м; в) 2,8 м; г) 3,4 м

Анализ полученных картин распределения и графиков изменения температуры позволил выяснить следующее. При непрерывном режиме продувки (рис.4) выравнивание температуры по объему расплава происходит приблизительно через 250 с, причем в нижней части ковша перепады температуры практически не наблюдаются (рис. 4,а), на более высоких уровнях они незначительно проявляются, достигая максимальных значений (около 50... 80 °С) в верхней зоне шлакового пояса ковша, особенно в пристеночных областях. При использовании импульсных режимов продувки, несмотря на их практически одинаковую суммарную продолжительность (около 200 с), результаты температурной гомогенизации различны. Для всех режимов (рис. 5 – 7) характерно интенсивное снижение температуры на первом интервале вдувания газа. Причем, как и для непрерывного режима, меньшие перепады температуры расплава наблюдаются в нижней зоне ковша, а максимальные в зоне шлакового пояса. По критерию температурной однородности расплава наилучшие результаты были получены при режиме 2, перепады температуры расплава составили 30...50 °С. Для остальных режимов свойственны большие колебания температуры металла к моменту окончания процесса обработки. При использовании импульсного режима 2 затраты газа на достижение такой же степени температурной однородности, как и при непрерывном режиме, оказались в 3,3 раза меньше, время обработки также сократилось в 3 раза. При продувке расплава в непрерывном режиме с расходом газа 0,5 м<sup>3</sup>/мин. в течение 3 мин. (как для режима 2) необходимая степень однородности металла по температуре не достигается, перепады температуры составляют 100...120 °С.

Таким образом, использование импульсных режимов продувки позволяет сократить расход газа, используемого для перемешивания расплава в сталеразливочном ковше агрегата ковш-печь, при сохранении необходимого уровня гомогенизации металла по температуре. Более эффективными являются схемы продувки, в которых расход газа на интервалах вдувания ступенчато уменьшается, а расход газа на интервале, следующем за интервалом паузы, не превышает по величине расход на предшествующем паузе интервале. Увеличение расхода газа после интервала паузы приводит к более значительным колебаниям температуры. В целом, определение оптимальных параметров режимов продувки металла для каждого конкретного агрегата ковш-печь необходимо выполнять индивидуально на основе результатов математического и физического моделирования.

#### Литература

1. Математическое моделирование процесса перемешивания стали в агрегате ковш-печь / А.Н.Смирнов, И.Н.Салмаш, Е.В.Ошовская, В.С.Седуш // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. Вип. 102. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – С. 71–81.
2. Sano M., Makino H., Ozawa Y., Mori K. // Iron and Steel Inst. Jap. 1986. V.26 / №4. – P. 298-304.
3. Моделирование процесса продувки стали в ковше газом в дискретном режиме / С.П.Еронько, С.В.Быковских, Ю.Г.Полонская, Е.В.Ошовская и др. // Математичне моделювання. – 2001. -№ 1.-С. 31 - 34.

© Смирнов А.Н., Ошовская Е.В., Салмаш И.Н 2006