

УДК 669.1

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ И ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПРОДУВКИ ДЛЯ РАФИНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ

*Д.А. ЛУБЯНОЙ, канд. техн.наук, доцент*  
*С.В. ЛУБЯНАЯ, ассистент*  
*О.И. САБЛИНА, ассистент*  
(Новокузнецкий филиал ТПУ, г. Новокузнецк)

Статья поступила 2 сентября 2012 года

Лубяная С.В. – 654066, г. Новокузнецк, Кемеровской обл., пр. Дружбы, 39,  
Новокузнецкий филиал Томского политехнического университета,  
Svetlana\_Lubyayana@mail.ru

Рассматриваются результаты работы по совершенствованию технологии и повышению качества металла, производимого на ОАО «ЗСМК» в течение последних двадцати лет, с использованием термовременной и внепечной обработки железоуглеродистых расплавов.

**Ключевые слова:** пульсирующая продувка, качество металла.

Термовременная обработка железоуглеродистого расплава была внедрена в период с 1991 по 2004 год в условиях литейного цеха ОАО «ЗСМК» на индукционных печах ИЧТ-10М. Она заключалась в нагреве расплава чугуна и проведении изотермической выдержки с целью получения однородного расплава. Проведенные на комбинате исследования с использованием высокотемпературного микроскопа «Leitz» [1] с применением методик, разработанных в Уральском политехническом институте (УПИ) [2], позволили определить оптимальные режимы термовременной обработки для различных классов чугунов (табл. 1). Данные режимы нашли широкое распространение и на других предприятиях Кузбасса [3]. Применение разработанных режимов термовременной обработки позволило значительно повысить качество продукции и снизить себестоимость ее производства. Так, например, был значительно сокращен расход ферросплавов, повышена эксплуатационная стойкость сменного сталеразливочного оборудования из чугуна индукционной плавки.

Кроме того, значительно повышена эксплуатационная стойкость поддонов сквозных изложниц, повышена стойкость изложниц для

кузнечных слитков. В настоящее время весь чугун, производимый для нужд комбината, подвергается термовременной обработке, а также в потоке параллельно с термовременной обработкой расплава чугуна осуществляется деазотация расплава кислыми шлаками. Данная технология разработана совместно со специалистами Сибирского металлургического института (СМИ) [5]. Опробована также и технология десульфурации чугуна [6].

Для дальнейшего повышения качества продукции и снижения ее себестоимости на комбинате предложена и реализована технология внепечной обработки расплава азотом или аргоном методом резонансно-пульсирующего рафинирования фурмами с газодинамическими пульсаторами [7,8]. Сущность такого рафинирования заключается в наложении на металл колебаний путем пульсирующего дутья, в спектре которого имеется низкочастотная составляющая, совпадающая с собственной частотой колебаний металла в ковше.

При выборе оптимальной частоты пульсаций фурмы для продувки чугуна азотом в промышленном ковше применили математическое моделирование. Интенсификация процесса пе-

Таблица 1

Параметры термовременной обработки чугуна на ОАО «ЗСМК»

Агрегат, предприятие	Чугуны, вид продукции	Температура перегрева, °С	Время выдержки, мин
Индукционная печь ИЧТ-10М, ОАО «ЗСМК»	Термостойкий чугун (поддоны, кузнечные изложницы, крышки промышленных ковшей МНЛЗ, изложницы и поддоны для производства ферросплавов)	1485...1520	8...10
ИЧТ-10М, ОАО «ЗСМК»	Износостойкий чугун для валков	1530...1550	10...15
ИЧТ-10М, ОАО «ЗСМК»	Шихтовая заготовка для высокопрочного чугуна	1510	10
Дуговая печь, ОАО «ЗСМК»	Шихтовая заготовка для валков	1530...1590	15...25
ИЧТ-10М, ОАО «ЗСМК»	Белый износостойкий чугун	1520...1550	10...15

ремешивания значительно увеличивается при наложении низкочастотных колебаний на металл путем подачи пульсирующего дутья, в спектре колебаний которого имеется низкочастотная составляющая, совпадающая с собственной частотой колебаний жидкости. Собственную частоту колебаний жидкости в цилиндре (ковше) высотой  $h$ , радиусом горизонтального основания  $r$  определяли по формулам [9]

$$\omega_{mn}^2 = g\omega_{mn}th(\omega_{mn}h), c^{-1} \quad (1)$$

или

$$(\omega_{mn})^2 = \omega_{mn}^2 r / g = \eta_{mn}th(\eta_{mn}h / r), \quad (2)$$

где  $\omega_{mn} = 2\pi f_{mn}$  – циклическая частота собственных колебаний,  $c^{-1}$ ;  $\eta_{mn} = \omega_{mn} r$  – корни первой производной функции Бесселя;  $\omega_{mn}$  – собственные числа задачи о главных колебаниях жидкости;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $th(\omega_{mn}h) = th x = e^x - e^{-x}/e^x + e^{-x}$  – гиперболический тангенс аргумента.

Тогда

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2}{D} g \eta_{mn} th \left( \frac{2\eta_{mn}h}{D} \right) \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $D$  – внутренний диаметр ковша, м.

После определения собственной частоты колебаний металла в ковше разработали конструкцию дутьевого устройства, генерирующего низкочастотную составляющую. В качестве ис-

точника колебаний использовали газодинамические пульсаторы. Сущность их работы состоит в следующем: в потоке газа находится плохо обтекаемое тело, за ним образуется вихревой след, причем вихри сбегают с определенной периодичностью, зависящей от формы и размеров конструкции, а также от скорости потока. Так, при обтекании цилиндра образуется вихревая дорожка Кармана. Направление вихрей попеременно меняется, угловая частота отделения вихрей определяется по формуле [9]

$$w = \frac{0,2 v}{2\pi K}, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость потока, м/с;  $K$  – диаметр цилиндрического пульсатора в фурме; 0,22 – число Струхала для цилиндрического пульсатора [9].

Тогда скорость потока  $v$ , м/с, будет определяться по формуле

$$v = 4\pi^2 f K / 0,22. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (3), (4) и (5), определяют оптимальные параметры продувки и размеры пульсатора. Данные расчетов по модели представлены в табл. 2. В таблице:  $D$ ,  $h$  – диаметр и высота ковша, м;  $f_{01}$ ,  $f_{11}$ ,  $f_{21}$  – номер частоты колебаний;  $V_{01}$  – расход газа для соответствующей частоты колебаний, м<sup>3</sup>/ч.

На этом принципе были разработаны конструкции дутьевых устройств для продувки чу-

Таблица 2

Параметры продувки (диаметр пульсатора 16 мм)

Ковш	$D$	$h$	$f_{01}$	$f_{11}$	$f_{21}$	$V_{01}$	$V_{11}$	$V_{21}$
60 т	2,45	2,5	0,611	0,787	0,882	7,746	9,981	11,179
10 т	1,3	1,35	0,839	1,08	1,21	10,634	13,701	15,347

гуна нейтральным газом. За основу была взята обычная фурма «ложный стопор». Внутри трубы устанавливаются цилиндрические пульсаторы. Как показали дальнейшие исследования, данный тип фурм генерирует целый спектр частот, значения которых определялись на промышленной установке с помощью импульсного прецизионного шумометра RFG00017. Анализ полученных в эксперименте частотных характеристик показал, что наибольший уровень звукового давления в средне- и высокочастотных областях при расходе инертного газа  $(8 \dots 16) \text{ м}^3/\text{ч}$  приходится на частоты  $(63 \dots 250) \text{ Гц}$ , при которых размеры неразрушенного газового ядра становятся минимальными. На практике это подтверждалось отсутствием «пробойных режимов», ярко выраженного пятна бурления в ковше. Это свидетельствует об оптимальности заданных дутьевых режимов и с точки зрения подавления вторичного окисления. Был оценен уровень виброскорости колебания фурмы от удельного расхода азота. Исследования виброскорости производили с помощью анализатора спектра, шума и вибрации LD 2800 производства фирмы «Ларсон-Дэвис». Результаты экспериментов показали, что обработка расплава производится в диапазоне от 1 до 23 000 Гц. Вследствие высоких значений мощности (порядка 100 Дб) интенсифицируется процесс перемешивания, повышаются степень рафинирования металла и усвоение ферросплавов.

Продувка азотом через фурмы данной конструкции благоприятно сказалась и на микроструктуре чугуна. Размер и распределение графита в чугуне изложниц значительно зависит от времени продувки (рис. 1). Времени менее 15 мин, как видно из рис. 1, явно недостаточно

для эффективного удаления крупного спелитого графита.

Как показали исследования, выполненные с помощью высокотемпературного микроскопа ИМАШ 20-78 при  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , такой графит и является инициатором зарождения трещин в изложницах. Для получения чугуна с благоприятной формой графита рекомендовано продувать чугун для кузнечных изложниц и шлаковых чаш не менее 15 мин, что повышает их стойкость. Увеличение времени продувки с 10 до 15 мин позволяет также увеличить степень усвоения ферросилиция на  $7 \dots 10 \%$ .

Количество графитовой спели, удаляемой из чугуна при продувке, в атмосфере над продуваемым азотом ковшем с чугуном  $Ус$ , мг /  $\text{м}^3$  в зависимости от времени продувки  $T$ , мин описывается выражением

$$Ус = 0.2 T^2 - 2.36 T + 28, R^2 = 0,987. \quad (7)$$

Выявлено, чем продолжительнее продувка, тем интенсивнее происходит спелеудаление над ковшем. Также выявлено, что при продувке чугуна азотом значительно удаляется титан и ванадий, попадающие в чугун из шихты доменной плавки. Уравнения регрессии по удалению титана  $\Delta Ti$ , % и ванадия  $\Delta V$ , % в процессе продувки в зависимости от исходного их содержания приведены ниже:

$$\Delta Ti = 0,1819 Ti_{исх}^2 + 0,3953 Ti_{исх} - 0,012, \\ R^2 = 0,8296; \quad (8)$$

$$\Delta V = 4,8942 V_{исх}^2 - 0,1921 V_{исх} + 0,0022, \\ R^2 = 0,6128, \quad (9)$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации.



$\times 100$

*a*

*б*

*в*

Рис. 1. Микроструктура образцов чугуна изложниц с различным временем продувки азотом:

*a* – 7,5 мин; *б* – 13 мин; *в* – 15 мин

Удаление этих элементов связано с окислением титана и ванадия кислородом, находящимся в техническом азоте, применяемом при продувке, а также с образованием нитридов титана и ванадия, термодинамическая возможность образования которых подтверждается микроструктурным анализом. Анализ экспериментальных данных и результаты статистической обработки убедительно показывают, что интенсивность удаления титана и ванадия значительно увеличивается при увеличении их исходного содержания выше 0,12 %. Превышение этих концентраций отрицательно сказывается и на микроструктуре чугуна из-за образования междендритного графита и цементитной составляющей, ухудшающих термостойкость чугуна. Ввиду этого для получения изложниц и шлаковых чаш максимальной стойкости было ограничено содержание этих элементов в чугуне пределом в 0,12 %.

Значительного изменения содержания азота в чугуне в процессе продувки чугуна азотом обнаружено не было. Продувка чугуна в заданных режимах значительно повысила механические свойства (табл. 3).

Анализ эксплуатационной стойкости отливок показал, что стойкость изложниц и поддонов, отлитых из чугуна, продутого азотом в данном режиме, повышается более чем на 10 %. Данная продувка эффективна при производстве изложниц, так как способствует получению благоприятной перлитной структуры, обеспечивающей приемлемую стойкость изложниц. Прочностные свойства чугуна после данной обработки повышаются до уровня 130...170 МПа, что позволяет в перспективе рассматривать данный чугун как конструкционный чугун марок СЧ10, СЧ15. Проработаны вопросы об использовании данных технологий при внепечной обработке и непрерывной

Таблица 3

**Изменение механических свойств доменного чугуна**

Вид обработки	Предел прочности $\sigma_v$ , МПа
Продувка азотом методом резонансно-пульсирующего рафинирования	130...170
Без продувки	91...105

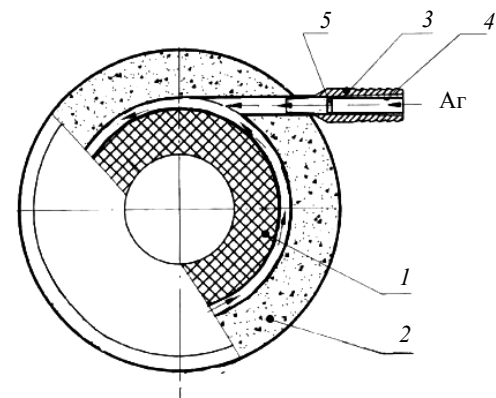


Рис. 2. Схема устройства для защиты струи металла при непрерывной разливке:

1 – разливочный стакан; 2 – погружной металлопровод (защитная труба); 3 – подводный патрубок; 4 – трубка подачи аргона; 5 – газодинамический пульсатор

разливке в конвертерном цехе. В результате внедрения термовременной обработки значительно (до 300 плавов) повышена эксплуатационная стойкость крышек промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ [4] из экономнолегированного чугуна.

Предложена схема защиты струи и внепечного рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ в ККЦ-2 с использованием воздействия на расплав газодинамических пульсаторов (рис. 2). Сущность предлагаемой технологии заключается в акустическом воздействии газовой струи на струю металла в защитной трубе от сталь-ковша к промежуточному ковшу при непрерывной разливке. Кроме защиты струи, наложение низкочастотных колебаний в режиме резонанса на металл, находящийся в приемной ванне промежуточного ковша, способствует снижению количества включений, макро- и микронеоднородности расплава.

Характер истечения аргона из трубы здесь также несколько иной. Как показали наши эксперименты и литературные данные [11], возрастающая при такой технологии поверхность взаимодействия позволяет значительно увеличить удельную мощность воздействия на расплав, увеличивается количество мелкодисперсной газовой фазы в промежуточном ковше, тем самым, как свидетельствуют данные работы [11], интенсифицируется рафинирование металла от неметаллических включений.





### Список литературы

1. *Эффективность* современных способов повышения качества изделий из чугуна и развитие металлургических и машиностроительных предприятий в условиях конкуренции / Д.А. Лубяной, Б.А. Кустов, Н.И. Новиков и др.; под ред. Д.А. Лубяного и Н.И. Новикова. – Новосибирск: Изд-во ИЭ-ОПП СО РАН. – 2004. – 131 с.

2. *Термовременная* обработка расплава чугуна / В.С. Цепелев, И.Ф. Селянин, Д.А. Лубяной, Б.А. Баум и др. // *Сталь*. – 1995. – № 5. – С. 42–45.

3. *Лубяной Д.А.* Результаты внедрения термовременной обработки на предприятиях Кузбасса // *Литейщик России*. – 2004. – № 7. – С. 22–23.

4. *Крышки* промежуточных ковшей МНЛЗ из экономнолегированного чугуна / Д.А. Лубяной, В.В. Требинская, И.А. Каминская и др. // *Сталь*. – 2006. – № 5. – С. 40–41.

5. *Поведение* азота при плавке чугуна в индукционных печах с кислой футеровкой / Д.А. Лубяной, Г.О. Нейгебауэр, В.П. Цымбал и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 2. – С. 76–80.

6. *Лубяной Д.А.* Анализ механизма и кинетики десульфурации чугуна в кислых индукционных пе-

чах промышленной и средней частоты // *Литейщик России*. – 2006. – № 12. – С. 22–25.

7. *Лубяной Д.А.* Применение резонансно-пульсирующего рафинирования для повышения качества изделий из чугуна // *Литейщик России*. – 2004. – № 7. – С. 30–32.

8. *Влияние* режимов внепечной обработки на структуру, литейные и механические свойства фосфористых доменных чугунов / Д.А. Лубяной, И.А. Синявский, И.Ф. Селянин и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2001. – № 6. – С. 53–55.

9. *Униговский Я.Б.* Выбор параметров колебаний при обработке жидких металлов в ковше // *Сталь*. – 1992.

10. *Патент* на ПМ 61710 (РФ), МПК 8 С21 С5/48. Фурма для продувки металла в ковше / Д.А. Лубяной, В.Г. Переходов, В.П. Комшуков, Ю.Н. и др. – 2006131724/22; Заявл.04.09. 2006; Оpubл. 10.03.2007, Бюллетень» Изобретения. Полезные модели». – 2007. – № 7.

11. *Ефимов Г.В.* Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше // *Сталь*. – 2001. – № 4. – С. 24–27.

### The effectiveness of handling and termovremennoy pulsating purge for refining iron melts

D.A. Lubyanyoy, S.V. Lubyanyaya, O.I. Sablina

At JSC “ZSMK” over the past twenty years been improving technology and quality of metal produced at the plant, using thermo-time and secondary treatment iron melts.

**Key words:** pulsating blowing, metal quality.