

УДК 669.162.267.6:669.721.002.5

**В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, А.М.Башмаков, Ю.И.Черевик**

### **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУРМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЛЯ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА**

Предложен и реализован ряд технических решений при разработке фурм нового поколения с улучшенными техническими и технологическими параметрами, использование которых улучшает технико-экономические показатели процесса и установок внепечной обработки чугуна.

#### **Современное состояние вопроса.**

Более чем тридцатилетний опыт эксплуатации установок десульфурации чугуна позволил выявить ряд недостатков, характерных существующим фурмам, и разработать комплекс технических мероприятий как по их модернизации и совершенствованию, так и по созданию фурм нового поколения. В основу разработки современных конструкций фурм и фурменных устройств были положены требования, сформулированные в работах [1,2], а также учитывалось то обстоятельство, что погружение фурм в расплав может осуществляться как под действием собственного веса, так и принудительно.

Для фурм, погружаемых под действием собственного веса, одним из важных конструктивных параметров является правильный выбор места расположения ее центра тяжести. Критерием оценки правильности выбора этого параметра может служить условие, при котором погруженная в жидкий металл фурма должна занимать устойчивое вертикальное положение в свободном состоянии. Это может быть достигнуто в том случае, если центр тяжести фурмы будет расположен как можно ниже поверхности расплава. Так, определение места расположения центра тяжести фурмы с коническим литым колоколом весом 450 кг и центральной толстостенной трубой  $\varnothing 180 \times 40$  и весом 340 кг показывает, что при погружении фурмы на глубину 2,0 м, он находится на расстоянии 935 мм от поверхности расплава [2].

#### **Постановка задачи.**

Конструкция фурмы была усовершенствована путем установки центральной трубы  $\varnothing 180 \times 20$  и увеличением веса колокола до 600 кг. Такая модернизация фурмы привела к тому, что расстояние между поверхностью расплава и центром тяжести фурмы составило 1280 мм, то есть увеличилось на 345 мм. Это свидетельствует о том, что положение фурмы в вертикальной плоскости стало более устойчивым, чем было раньше. Практика эксплуатации таких фурм показывает, что увеличение их веса за счет утяжеления массы литого колокола приводит к тому, что процесс продувки протекает более спокойно, уменьшается амплитуда колебаний колокола, увеличивается срок службы футеровки.

Одним из важных технологических требований, предъявляемых к процессу десульфурации, является то, чтобы при погружении фурмы в емкость с жидким металлом нижний срез испарительной камеры занимал строго определенное положение относительно дна емкости. Расстояние между нижним срезом и дном емкости должен составлять 200–250 мм. Для фурм, погружаемых под действием собственного веса, выполнение этого требования возможно только при сохранении веса фурмы постоянным. В реальных условиях, из-за намораживания чугуна на наружной поверхности фурмы, ее вес может изменяться от 2500 до 3500 кг, что затрудняет установку фурмы на необходимом расстоянии от дна емкости.

#### Изложение основных материалов исследования.

Для устранения этого недостатка предлагается на фурменное устройство в области штанги устанавливать специальный балластный груз. Когда фурма новая и имеет минимальный собственный вес, балластный груз должен иметь свой максимальный вес. По мере эксплуатации фурмы ее вес будет постепенно увеличиваться. Пропорционально увеличению веса фурмы вес балластного груза должен уменьшаться. Это позволит сохранить общий вес фурменного устройства практически постоянным в течение всего времени ее эксплуатации.

Практическая реализация такого варианта может быть выполнена двумя способами, которые представлены на рис. 1, а и б.

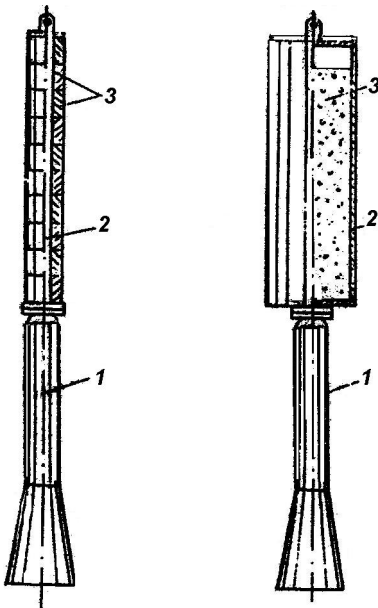


Рис. 1. Принципиальные схемы фурм постоянного веса с балластным грузом: а – балластный груз выполнен в виде набора секций; б – балластный груз выполнен в виде сыпучего материала.

В первом случае (рис. 1,а) эта задача решается благодаря выполнению балластного груза в виде набора цилиндрических кольцевых литых чугунных секций 3, внутренний диаметр которых несколько больше наружного диаметра штанги 2. Количество таких секций и их вес определяется технологическими условиями, то есть необходимой степенью точности установки фурмы относительно заданного

рабочего положения. Так, например, при общем весе балластного груза в 1000 кг он может набираться из 10–ти секций весом по 100 кг каждая. Во втором случае (рис. 1,б) штанга выполняется в виде трубы большого диаметра, внутренняя полость которой заполняется сыпучим материалом, например, песком или щебнем, количество которого определяется и регулируется аналогично предыдущему.

Такая конструкция фурменного устройства рекомендуется для установок десульфурации чугуна, у которых фурмы устанавливаются в рабочее положение приводом с гибким силовым элементом путем свободного опускания под действием силы тяжести. Удобство такого фурменного устройства заключается в том, что оно сравнительно легко вписывается в ограниченное пространство шахт существующих установок и поэтому достаточно просто реализуется при их модернизации.

Для фурм, погружаемых в расплав принудительно, вес фурмы не имеет принципиального значения, так как не влияет на точность ее установки относительно дна емкости. Поэтому модернизация существующих фурм или создание новых должна осуществляться путем оптимизации их веса с обеспечением необходимых прочностных характеристик. Реализуется это благодаря правильному выбору их жесткости и частот собственных колебаний, определению реальных амплитудно–частотных характеристик, исключая работу оборудования в резонансных режимах или приближение к ним, то есть обеспечивающих минимальные динамические нагрузки в основных элементах фурменного устройства, в деталях и узлах механизма его привода и элементах металлоконструкции. Кроме того, конструкция новых фурм должна быть быстроразъемной, а также легкой в обслуживании и эксплуатации.

На рис. 2, б приведена современная конструкция фурмы нового поколения с коническим колоколом, которая используется при обработке жидкого чугуна в емкостях с глубиной погружения до 2,0–2,3 метра. Оптимальные размеры испарительной камеры у этих фурм составляют: максимальный внутренний диаметр в нижней части колокола – 450 мм, а высота – 800 мм. Внутренняя полость камеры выполняется литой металлической. Наружный диаметр колокола составляет 700 мм, а длина футерованной части – 3500 мм. Вес такой фурмы равен 1600–1650 кг, а фурменного устройства в сборе – 2100 кг.

Конструкция фурмы с глубиной погружения более 2,5 метра приведена на рис. 2,а. При больших глубинах погружения используются фурмы с прямоточным каналом, так как в этом случае гранулированный магний, поднимаясь к поверхности, успевает нагреться, расплавиться, испариться и взаимодействовать с серой чугуна. Причем процессы бурления и барботаж в этом случае происходит более спокойно, чем у фурм с колоколом.

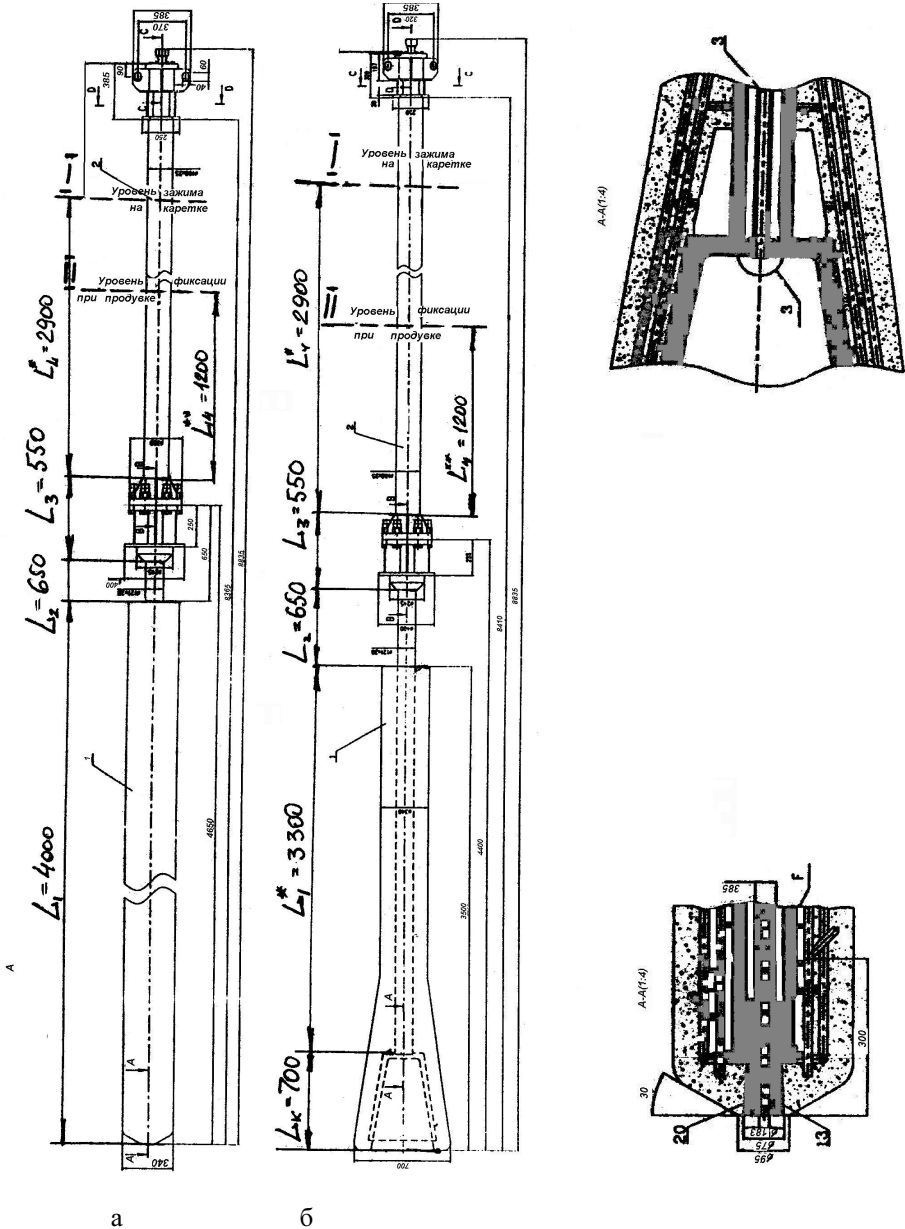


Рис. 2. Фурменные устройства нового поколения. а – фурменное устройство с прямоточной фурмой; б – фурменное устройство с коническим колоколом у фурмы.

Гранулированный магний подводится к фурменному устройству сверху и подается в жидкий металл по магниепроводу, проходящему внутри по оси штанги и фурмы.

Диаметр канала магниепровода у фурм обеих конструкций составляет 18,3 мм, а футерованного ствола – 340 мм. Диаметр несущей трубы обеих фурм равен  $\varnothing 121 \times 28$ , а штанги –  $\varnothing 168 \times 25$ . Длина фурменного устройства в сборе составляет 8835–8855 мм.

Интенсивность нагрева частиц магния в значительной мере зависит от степени их рассеивания на поверхности жидкого чугуна, которая определяется углом раскрытия струи, высотой испарительной камеры и скоростью ввода реагента. У фурм существующих конструкций угол раскрытия струи не регулируется, поэтому диаметр площади рассеивания гранул магния зависит только от высоты испарительной камеры и определяется зависимостью  $d_p = 0,143h$  [3]. Расширить технологические возможности фурмы можно путем профилирования выхода в испарительную камеру. При использовании в подводящем трубопроводе фурмы на входе в ИК профилированных сопел этот диаметр можно увеличить в 2,0 раза и более, что приводит к более рациональному использованию потенциальных возможностей системы ввода магния в чугун и более оперативному обеспечению теплом испарения всего магния, вводимого в камеру.

Большинство огнеупорных масс, из которых изготавливаются фурмы, не могут обеспечивать продувку чугуна продолжительностью более 5 минут. Это приводит к усложнению конструкции участков, на которых обрабатываются ковши с чугуном, и снижает возможности получения чугуна с низким содержанием серы (0,005÷0,001 %). Поэтому весьма актуально применение огнеупорных футеровок, обеспечивающих продолжительность времени одной продувки 10,0 мин и более. Одним из путей решения этой задачи является использование в качестве материала для футеровки специальных огнеупорных бетонов.

Поскольку футеровка фурмы обеспечивает ограниченное количество продувок, поэтому конструкция узла крепления фурменного устройства к каретке должна обеспечивать оперативную и легкую его замену. В предлагаемой конструкции эта задача решается путем установки на консольной части каретки двух зажимов замкового типа с откидными захватами и фиксирующими штурвалами (рис.3). Такая конструкция зажимов обеспечивает установку и демонтаж фурменного устройства с минимальной потерей времени.

Важными техническими характеристиками фурм и фурменных устройств, определяющими устойчивость их поведения во время продувки, а также надежность и долговечность работы всего оборудования установки в целом, является их жесткость и прочность. От правильного выбора этих параметров зависит, какие колебательные процессы будут возникать в установке во время десульфурации, как они

будут восприниматься узлами и деталями привода, а также передаваться на элементы металлоконструкции и расположенные на ней помещения, оборудование и обслуживающий персонал. Важно также оценить, как можно влиять на управление этими параметрами в случае возникновения такой необходимости.

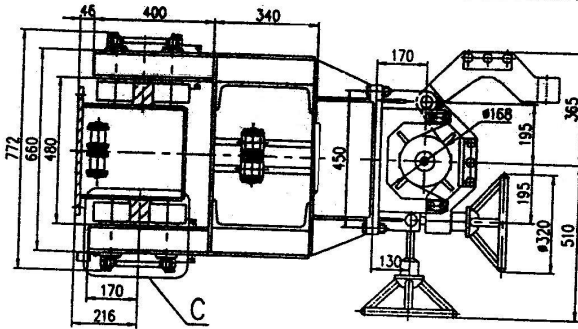


Рис. 3. Узел крепления фурменного устройства на каретке.

Суммарная жесткость фурмы складывается из трех составляющих:

жесткости центральной трубы, металлического каркаса и огнеупорной футеровки. Центральная труба и металлический каркас образуют основной скелет фурмы. У фурм с колоколом центральная часть ствола представляет собой массивную трубу длиной 2,5–2,6 метра, а металлический каркас – объемную жесткую конструкцию, состоящую из двух кольцевых продольных поясов, выполненных из арматурных стержней, обвязанных направляющими кольцами, приваренными к несущей трубе и корпусу испарительной камеры (рис. 4). Третьей составляющей является огнеупорная футеровка.

При более чем тридцатилетней эксплуатации фурм совершенствование их конструкции осуществлялось как путем модернизации их скелетной части, приводящей к снижению веса и жесткости, так и к улучшению их термодинамических показателей за счет разработки и использования более стойких огнеупорных футеровок, приводящих к увеличению времени одной продувки.

Модернизация конструкции скелета осуществлялась путем уменьшения размеров наружного диаметра и толщины стенки центральной трубы, а также благодаря уменьшению диаметра арматурных стержней. Так, при проектировании первых фурм наружный диаметр центральной трубы составлял 0,194 м, толщина стенки 0,045 м, диаметр арматурных стержней 0,020 м, а их количество 12 штук. Считалось, что такие размеры обеспечат фурме необходимую прочность и жесткость.

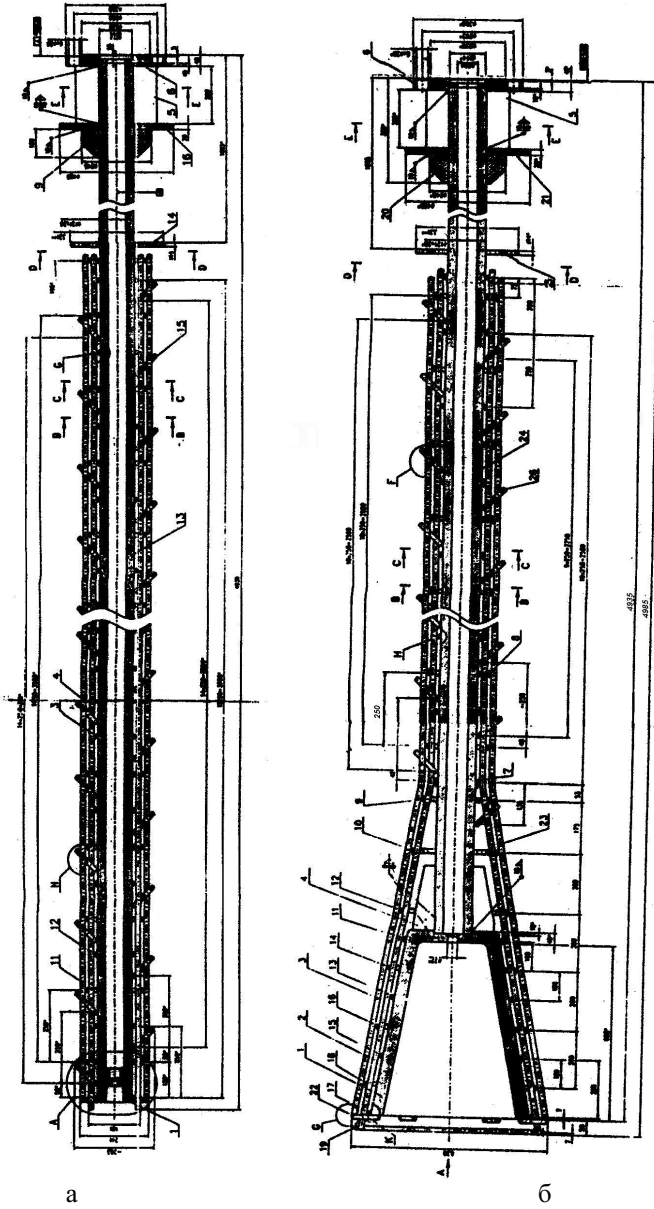


Рис. 4. Принципиальная схема скелета формы. а – прямоточная; б – с коническим колоколом.

Современные фурмы нового поколения имеют центральную трубу с наружным диаметром 0,121 м и толщиной стенки 0,028 м, а арматурные стержни диаметром 0,016 м в количестве 12 штук. Характер изменения размеров элементов скелета фурмы во времени представлен в табл.1.

Улучшались также за это время и физико–механические свойства огнеупорных масс футеровки. Коксо–глинистые смеси были заменены коксо–карборундовыми. Хотя время продувки и у этих фурм не превышает 5–ти минут, но их прочностные характеристики увеличились в 1,5–2,0 раза (таблица 2). Так, например, предел прочности на разрыв футеровок, выполненных из коксо–карборундовой смеси достигает 29,5 кгс/см<sup>2</sup>, тогда как из коксо–глинистых смесей его максимальные значения не превышали 13,0 кгс/см<sup>2</sup> [1].

Таблица 1. Характер изменения геометрических параметров скелета фурм

№№ п/п	Наименование, размерность	Время эксплуатации		
		1980– 1989	1990– 1999	2000– 2005
1.	Наружный диаметр центральной трубы, $D_n$ , м	0,194	0,180	0,121
2.	Толщина стенки центральной трубы, м	0,045	0,036	0,028
3.	Количество арматурных стержней, штуки	12	12	12
4.	Диаметр арматурных стержней, $d$ , м	0,020	0,018	0,016
5.	Количество поясов жесткости, штук	2	2	2
6.	Наружный диаметр огнеупорного ствола, $D_o$ , м	0,38	0,36	0,34
7.	Диаметр малого кольцевого пояса каркаса, $D_1$ , м	0,254	0,234	0,169
8.	Диаметр большого кольцевого пояса каркаса, $D_2$ , м	0,314	0,288	0,217

Принципиально новый количественный и качественный результат был получен в начале 2000 года после разработки и практического использования фурм с футеровкой, выполненной из огнеупорных бетонов армированных металлической фиброй. Время одной продувки жидкого чугуна такими фурмами удалось увеличить до 20 минут. Достигается это в результате того, что фурменная масса, формирующая огнеупорный бетон, включает высокоглиноземистый муллитокорунд и высокоогнеупорный цемент с содержанием  $Al_2O_3$ , а также карбидкремния с содержанием SiC. Дополнительное повышение прочностных



характеристик фурм с футеровкой из огнеупорного бетона достигается благодаря добавке в огнеупорную массу мелкой фибры, представляющей собой короткие металлические иголки, выполненные из стальной армированной проволоки сечением  $0,3+0,8$  мм и длиной 20...30 мм с содержанием хрома 18...19 % и никеля 8...9 %. Количественное содержание такой проволоки составляет 3 % от общей массы огнеупорной смеси.

Использование в бетоне наполнителя из мелкой фибры позволило значительно увеличить его прочностные характеристики. Причем, увеличился не только предел прочности на разрыв более чем в 1,5 раза (таблица 2), но значительно вырос предел прочности на изгиб, что очень важно для фурм, так как на нее при продувке действует не только вертикальная составляющая от технологической нагрузки, растягивающая или сжимающая ствол фурмы, но и горизонтальная составляющая изгибающая ствол фурмы и способствующая повышению трещинообразования футеровки, а, следовательно, ограничению ее срока службы.

Таблица 2. Прочностные характеристики огнеупорных смесей

№№ п/п	Наименование смеси	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности на разрыв, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)
1.	Коксо–глинистая	1403–1460	<u>7,5 – 13,0</u> 75–130
2.	Коксо–карборундовая	1490–1540	<u>14,0 – 29,5</u> 140–295
3.	Цементно– муллитокорундовая с добавкой карбида кремния и фибры	не менее 2650	<u>35,0 – 47,0</u> 350–470

### **Выводы.**

В результате выполненных исследований и разработок получены следующие результаты:

- показано, как необходимо усовершенствовать конструкцию фурмы и правильно выбрать место расположения ее центра тяжести, чтобы она занимала устойчивое вертикальное положение в свободном состоянии;
- предложено ряд технических решений, позволяющих управлять весом фурмы, практическая реализация которых, путем использования балластного груза, позволяет поддерживать вес фурмы постоянным в течение всего времени ее эксплуатации;

– разработаны облегченная конструкция фурмы нового поколения и устройство крепления ФУ на каретке, обеспечивающее быструю установку ФУ в рабочее положение и легкий демонтаж при замене новым;

– для ускорения испарения магния в подводящем трубопроводе на входе в ИК, предложено установить профилированное сопло, позволяющее увеличить угол раскрытия струи;

– показано, что одним из важных параметров фурмы является ее жесткость, от правильного выбора которой зависит, какие колебательные процессы и динамические нагрузки будут возникать в установке во время десульфурации, а также установлено как можно управлять жесткостью фурмы;

– показано, что разработка и использование футеровки из огнеупорных бетонов с наполнителем из металлической фибры, улучшает термодинамические и механические показатели фурм, увеличивая время одной продувки до 20 минут и прочностные показатели фурмы в целом.

В результате выполненных исследований и разработок предложен и реализован ряд технических решений при создании фурм нового поколения с улучшенными техническими и технологическими параметрами, использование которых улучшает технико-экономические показатели процесса десульфурации и значительно упрощает при этом конструкцию оборудования установок внепечной обработки чугуна.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 238 с.
2. *Анализ конструкций фурм и устройств, используемых для десульфурации чугуна.* / В.И.Большаков, А.М.Башмаков, А.Ф.Шевченко, Ю.И.Черевик //Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии. Вып.8.. – 2004. – С.381–389.
3. *Костицын Е.А., Воронова Н.А.* Работа подколокольного пространства фурмы как испарительной камеры при вдувании гранулированного магния в чугун// Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. – Сб. тр. ИЧМ. – М.: Металлургия, 1978. – Вып.4. – С.66–72.

*Статья рекомендована к печати д.т.н, А.С.Вергуном*