

УДК 669.162.221:669.046:669.721

А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.В.Остапенко, И.А.Маначин,  
С.А.Шевченко

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ФУРМ РАЗЛИЧНОЙ  
КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ИНЖЕКТИРОВАНИЯ В ЧУГУН  
ДИСПЕРГИРОВАННОГО МАГНИЯ БЕЗ ДОБАВОК**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Проведен анализ работы фурм различной конструкции для десульфурации чугуна. Показаны преимущества и недостатки каждой. Определена перспектива применения двухсопловой фурмы для вдувания зернистого магния и освоения процесса десульфурации чугуна диспергированным магнием с высокой скоростью и эффективностью десульфурации.

**Ключевые слова:** десульфурация, чугун, магний, двухсопловая фурма

**Введение.** В черной металлургии в последние десятилетия практически повсеместно технологическая цепочка производства качественной металлопродукции дополнилась новым процессом – внепечной десульфурации чугуна. Этот процесс предусматривает в основе инжектирование магниевых реагентов, обеспечивающим наиболее экономичное снижение содержания серы при производстве низкосернистого чугуна,  $[S]=0,001-0,010\%$ , и особо чистой по сере стали,  $[S]=0,001-0,005\%$  [1,2].

В мировой практике внепечной десульфурации чугуна используются различные технологии инжектирования магниевых реагентов [1, 2]: инжектирование «чистого» гранулированного или фрезерованного обкатанного магния и его сплавов без добавок, вдувание смесей магния с кальцийсодержащими добавками путем моно-, ко-, и мультиинжекции. Для вдувания магниевых реагентов применяются высокоавтоматизированные комплексы с дозирующими блоками различной конструкции, в том числе механического и аэрационного дозирования. Ввод реагентов вглубь расплава (1,5-4,0 м) осуществляется погружными фурмами различных типов и конструкций.

Технологичность, надежность и экономичность инъекционных способов десульфурации чугуна в значительной мере определяются работоспособностью фурм, стойкостью их футеровки, трудозатратами по обслуживанию, а также ценой фурменных устройств. Поэтому фурмы являются одним из ключевых узлов комплексов десульфурации чугуна. Выбор конструкции фурмы, огнеупорной футеровки и параметров ее работы определяются рядом факторов, в том числе конструктивными характеристиками и возможностями равномерной, без пульсаций, подачи реагента дозирующими устройствами, физико-химическими характеристиками применяемых реагентов – десульфураторов и типом газа-носителя, исходными условиями эксплуатации (в том числе уровнем

наполнения ковшей, количеством и физическими свойствами шлака), а также требованиями к циклу обработок и производительности комплексов десульфурации чугуна и скачивания шлака.

Известны многочисленные конструкции фурменных устройств для подачи вглубь чугуна магниевых реагентов и смесей методом инжектирования [1, 2, 3]. Предпринятые попытки применить прямоточные фурмы (в т.ч. «пробивные», двухпоточные с кольцевым зазором) для вдувания в расплав диспергированного магния без добавок не обеспечивали достаточную эффективность и надежность процесса в промышленных условиях. В начале 70-х годов прошлого столетия, на начальном этапе использования магниевых реагентов для внедоменной десульфурации чугуна, задача надежного инжектирования «чистого» магния в расплав впервые была кардинально решена специалистами Института черной металлургии (г. Днепропетровск) [1] за счет применения фурм с испарительными камерами (Рис.1).

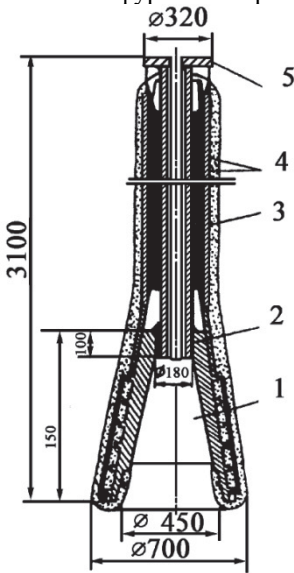


Рис.1. Конструкция фурмы с испарительной камерой конической формы: 1 – испаритель; 2 – несущая труба; 3 – канал; 4 – стальная арматура; 5 – фланец; 6 – огнеупорная футеровка.

При использовании испарительной камеры инжекционный канал 3 (Рис.1) не контактирует с жидким чугуном, чем обеспечивается его надежная работоспособность.

Рациональные габаритные размеры испарительной камеры (высота, площадь в основании) способствуют созданию благоприятных локальных условий для растворения магния в чугуне, как в испарительной камере, так и под ней, и как следствие, обеспечивают эффективное его усвоение расплавом.

Было установлено, что технологичность процесса десульфурации улучшается, если испарительная камера выполняется с торцевым зубчатым срезом или с отверстиями в нижней части боковых стенок. Однако, в этих случаях возрастает трудоемкость ее обслуживания. Повышению на 15-20 %<sub>отн</sub> эффективности процесса десульфурации

способствовал ввод реагента в расплав в струе природного газа. Работа фурм с испарительными камерами характеризовалась следующими параметрами:

- интенсивность вдувания магния - 6 – 10 кг/мин;
- расход газа на вдувание - 30 -50 нм<sup>3</sup>/ч;
- внутренний диаметр канала - 12 – 20 мм;
- наружный диаметр футеровки фурмы: - 300 -500 мм;
- стойкость футеровки:
  - из углеродсодержащей массы - до 10000 обработок;
  - из огнеупорного бетона - 60 – 120 обработок;
- длительность погружения фурмы в чугун:
  - углеродсодержащая футеровка - 3,5 – 6 мин;
  - футеровка из огнеупорного бетона - до 20 мин.

При вдувании гранулированного магния в чугун на глубину до 2,6 м фурмы с испарительными камерами отвечали промышленным требованиям, процесс десульфурации характеризовался надежностью, эффективностью, стабильностью достигаемых результатов и экономичностью. При глубине погружения фурмы в чугун более 2,6 м испаритель уже не в полной мере обеспечивает одну из своих основных функций – испарение магния, так как при давлении более 0,4 МПа и локальной температуре в испарителе около 1200 °С, магний находится в жидком виде. Это нарушает тепловую работу испарителя, ускоряет образование наростов на его стенках и может при подъеме фурмы приводить к повышению бурности процесса, вплоть до выплесков чугуна из ковша.

К недостаткам применения фурм с испарительными камерами следует отнести:

- усложнение реализации процесса при глубине ванны чугуна более 2,6 м, из-за ухудшения условий испарения магния при большой глубине расплава и интенсивного зарастания испарителя;
- трудоемкость обслуживания испарительных камер;
- ограничения по интенсивности вдувания магния в чугун (в основном до 10 кг/мин);
- ограничения по наполнению ковшей чугуном под обработку (0,5-0,6 м свободное пространство над расплавом).

Решая задачу реализации процесса десульфурации чугуна в большегрузных ковшах, украинские специалисты разработали, опробовали и внедрили установки для десульфурации чугуна гранулированным магнием в большегрузных ковшах [2, 4], включающую дозаторы с роторными питателями для равномерной подачи магния и прямооточные фурмы со сменными огнестойкими углеродсодержащими втулками и сменными соплами из титановых сплавов. Принципиальная конструкция оголовка прямооточной, односопловой фурмы со сменной

графитовой втулкой и сменным соплом показана на Рис.2 а. При отработке параметров работы этой фурмы было установлено, что при вдувании зернистого или гранулированного магния в зависимости от условий или параметров вдувания срез сопла фурмы может сохранять свои геометрические параметры, но возможны случаи, когда происходит либо «разгар» сопла фурмы, (Рис.2 б), либо его зарастание на выходе, (Рис.2 в).

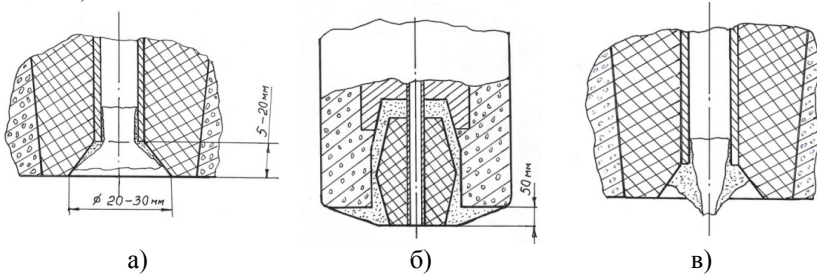


Рис.2. Оголовок прямоточной фурмы.

- а – принципиальная конструкция оголовка прямоточной фурмы;  
 1 – канал фурмы, 2 – сопло; 3 – графитовая вставка; 4 – футеровка,  
 б – схема «разгара» сопла,  
 в – схема образования наростов

Устойчивое вдувание магния в жидкий чугун и достаточно надежная работа сопла фурмы (без зарастания) обеспечивались при давлениях газа 0,9 – 1,0 МПа и расходах 140 – 150  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Следует отметить, что высокие расходы газа-носителя при использовании прямоточных фурм связаны с вертикальным расположением канала и сопла фурмы. Двухфазный поток, выйдя в «холодном» состоянии из сопла фурмы, далее в виде пузырей газа-носителя и образующихся паров магния поворачивает вверх, образующиеся при этом в расплаве каверны способствуют захлестыванию устья канала, а близость жидкого чугуна от устья канала может приводить к периодическому их столкновению. Соприкосновение с жидким чугуном вызывает мгновенное торможение двухфазного потока или даже его остановку, что может приводить к закупорке сопла фурмы. Поэтому специалисты Института черной металлургии, совершенствуя [5] конструкцию прямоточных фурм выполнили оголовки с отгибом канала от вертикальной оси на угол 30 – 50°, Рис.3.

Изгиб канала под углом к вертикальной оси фурмы позволил в процессе обработки жидкого чугуна отодвинуть пузыри транспортирующего газа и образующихся паров магния в сторону от устья канала. Всплывая они в меньшей степени контактируют со срезом сопла фурмы, т.е. зона барботаж жидкого чугуна смещается в сторону от устья сопла. Тем самым уменьшаются время и частота контакта устья сопла с жидким чугуном. Это положительно сказывается на стойкости сменного сопла и снижает вероятность зарастания сопла фурмы. Кроме того, исследования [6]

проведенные на «холодной» модели показали, что наклон сопел обеспечивает более благоприятные условия взаимодействия магнийсодержащего потока с расплавом, что подтвердилось большим газосодержанием и большей суммарной поверхностью образующихся газовых пузырей. Причем наибольший эффект увеличения межфазной поверхности достигался при угле отгиба сопла к вертикальной оси, равным  $45^\circ$ .

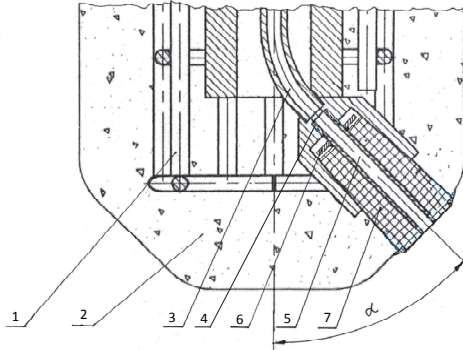


Рис.3. Оголовок фурмы с отгибом канала.

1 – арматура каркаса; 2 – футеровка; 3 – отвод; 4 – обойма; 5 – сменное сопло; 6 – графитовая вставка; а – угол отгиба канала

Промышленное опробование работы фурм с отгибом канала, проведенное на заливочных ковшах емкостью 130 – 150т, показало, что устойчивое вдувание магния и надежная работа сопла фурмы обеспечиваются при следующих параметрах:

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| - внутренний диаметр канала фурмы      | - 12 мм;                             |
| - внутренний диаметр сопла             | - до 10 мм;                          |
| - интенсивность вдувания магния        | - 8 – 12 кг/мин;                     |
| - расход газа на вдувание магния       | - 110 – 130 $\text{нм}^3/\text{ч}$ ; |
| - свободное пространство над расплавом | - 0,4 – 0,5 м;                       |
| - наружный диаметр футеровки           | - 340 мм;                            |
| - стойкость футеровки                  | - 60–120 обработок;                  |
| - продолжительность обработки          | - 5 – 12 мин. (в основе)             |

Применение для вдувания магния в чугун фурм с изгибом канала на выходе и осуществление инжектирования не вертикальной струей, а под углом, позволило уменьшить расход газа-носителя до 110 – 130  $\text{нм}^3/\text{ч}$  при сохранении надежности работы среза сопла фурмы. При этом процесс вдувания магния осуществлялся более спокойно и технологично, что можно объяснить как уменьшением расхода газа-носителя, так и лучшим распределением и диспергированием газовых пузырей в объеме жидкой ванны. Однако существенно повысить интенсивность вдувания магния, что особенно важно при обработке большегрузных ковшей емкостью 150 - 300 тонн, используя фурмы с изгибом канала, не представилось возможным. Поэтому дальнейшее совершенствование конструкции фурм отечественными и зарубежными специалистами велось в направлении повышения интенсивности вдувания магния за счет использования

двухсопловых и многосопловых фурм, обеспечивающих более равномерное распределение мест ввода реагента в объем жидкой ванны.

На рис.4 представлена конструкция оголовка двухсопловой фурмы, разработанной специалистами Института черной металлургии [7].

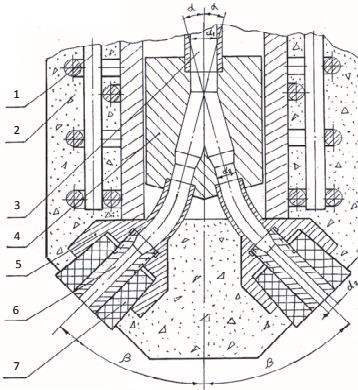


Рис.4. Оголовок двухсопловой фурмы.

1 – арматура каркаса; 2 – футеровка; 3 – канал фурмы; 4 – разделитель потока; 5 – отвод с обоймой; 6 – сменное сопло; 7 – графитовая вставка; а – угол отгиба канала.

Дооснащение центрального канала фурмы разделителем потока позволяет разделить его на два или больше потоков и тем самым повысить интенсивность подачи магния в расплав за счет рассредоточения мест ввода реагента в объем жидкой ванны. Экспериментальная и последующая промышленная проверка работы двухсопловых фурм на ряде металлургических предприятий при обработке чугуна в 150-300-тонных заливочных ковшах подтвердила надежность и более высокую пропускную способность двухсопловых фурм конструкции ИЧМ. Было установлено, что технологичное вдувание магния без добавок в расплав и надежная работа фурмы обеспечиваются при следующих условиях протекания процесса и параметрах:

- реагент – зернистый или гранулированный магний с диаметром частиц - 0,4 – 1,6 мм;

- инжектирующий газ - азот, аргон;

- давление газа в сети - 0,9 – 1,1 МПа;

- расход инжектирующего газа :

- при погружении фурмы - 140 – 150  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;

- при вдувании магния - 120 – 140  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;

- интенсивность подачи магния - 12 – 22 кг/мин;

- глубина погружения фурмы в чугун - 2,6 – 4,0 м;

- свободное пространство над расплавом - 0,25 – 0,4 м;

- внутренний диаметр канала фурмы - 12 мм;

- скорость потока на выходе из фурмы - не менее 90  $\text{нм}^3/\text{ч}$ ;

- дозатор магния – роторный питатель с погрешностью интенсивности подачи магния (в т.ч. мгновенной) - не более 2%;

- наружный диаметр футеровки из огнеупорного бетона - 340 мм;
- стойкость футеровки - 60 – 120 обработок;
- продолжительность вдувания магния - 4 – 12 мин.

Для технологичного ввода магния в расплав с интенсивностью более 9 кг/мин и с целью повышения эффективности процесса десульфурации авторами [8] предложена конструкция двухпоточной фурмы двухярусного исполнения, обеспечивающая создание нейтральной газовой атмосферы над поверхностью расплава. Лабораторные эксперименты в 150 кг индукционной печи подтвердили работоспособность предложенных конструкций двухпоточных фурм. Однако, надежность и эффективность работы двухпоточных предложенной конструкции требует проверки в промышленных условиях.

В настоящее время на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях для вдувания в чугун диспергированного магния без добавок промышленное применение получили фурмы с испарительными камерами, фурмы с прямоточным каналом, с отгибом канала, двухсопловые (У- и Т-образные). В табл.2 приведены результаты исследования в промышленных условиях фурм различной конструкции при вдувании в жидкий чугун «чистого» гранулированного или фрезерованного магния без кальцийсодержащих добавок. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что в наибольшей степени требованиям по надежному вдуванию в расплав и эффективности процесса при глубине ввода магния в чугун на глубину до 2,6 м отвечают фурмы с испарительными камерами, а при большей глубине - двухсопловые.

Таблица 2.Сопоставление показателей и параметров работы фурм различной конструкции при инжестировании «чистого» магния без добавок

№	Показатели, параметры	Ед. изм.	Тип фурмы				
			с испарителем	с прямоточным каналом	с отгибом канала	двухсопловые	
						У-образные	Т-образные
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Тип газа-носителя	-	N <sub>2</sub> , Ar, CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	N <sub>2</sub> , Ar	N <sub>2</sub> , Ar	N <sub>2</sub> , Ar
2	Давление газа в сети	МПа	0,4 – 0,5	0,7 – 0,8	0,7 – 0,9	0,9 – 1,1	0,9 – 1,1
3	Расход инжестрирующего газа: - при погружении - при вдувании	нм <sup>3</sup> /ч нм <sup>3</sup> /ч	60 -80 30 -50	160 -170 140 -150	140 -150 110 -130	140 -150 120- 140	180 - 220 140 - 220
4	Интенсивность подачи магния	кг/мин	6 -10	8 -10	8 -12	12 - 22	6 -10
5	Скорость потока на выходе из фурмы	м/с	30 - 40	не менее 90	не менее 90	не менее 90	не менее 90
6	Концентрация магния в газе-носителе	кг/м <sup>3</sup>	12 -15	3,5 -4,5	4,5 – 6,5	6 - 11	2,5 -4,5
7	Глубина погружения фурмы в чугун	м	1,5 – 2,6	2,6 – 3,5	2,6 – 4,0	2,6 – 4,0	2,6 – 4,0

8	Свободное пространство над расплавом	м	0,5 – 0,6		0,5 – 0,6	0,4 – 0,5	0,25 – 0,4	0,6 – 0,7
9	Внутренний диаметр центрального канала	мм	12 - 15		12	12	12	12
10	Внутренний диаметр сопел	мм	-		12	8 -10	7 - 8	10
11	Тип футеровки	-	огнеупорный бетон	углеродсодержащая масса	огнеупорный бетон	огнеупорный бетон	огнеупорный бетон	огнеупорный бетон
12	Наружный диаметр футеровки	мм	340	500	340	340	340	340
13	Продолжительность вдувания магния	мин	6 - 15	3,5 - 4	5 - 10	5 -10	4 -12	5 - 12
14	Стойкость футеровки	обр.	60- 120	1000 - 10000	60 -120	60 -120	60 -120	60 -120
15	Количество обработок в контрольном массиве	обр.	40		16	5	24	15
16	Содержание серы (среднее):							
	- до обработки	%	0,015		0,022	0,020	0,024	0,021
	- после обработки	%	0,006		0,010	0,006	0,003	0,006
17	Степень десульфурации (средняя):							
	- суммарная	%	60,0		54,5	70,0	87,5	71,4
	- удельная	%	43,2		34,3	24,0	25,2	19,0
18	Снижение температуры чугуна (среднее):							
	- за обработку	°C	7,8		8,2	7,0	6,5	14,3
	- удельное	°C/мин	1,1		0,85	0,8	0,68	1,4
19	Степень усвоения магния (средняя):							
	-	%	41,6 85,5		48,2 76,8	33,1	37,1	22,8
	-	%				-	-	-

Фурмы с испарительными камерами обеспечивают возможность вдувания «чистого» магния при достаточно высокой концентрации его в газе-носителе. Причем для инжестирования магния могут использоваться не только осушенные сжатый воздух, азот и аргон, но и природный газ. Применение в качестве газа-носителя природного газа позволяет повысить эффективность использования магния на удаление серы на 15 - 25 %<sub>отн.</sub> Это достигается за счет создания более благоприятных условий для растворения магния в чугуне под испарителем, где имеет место локальное охлаждение чугуна, связанное с отбором тепла на разложение метана, а также за счет создания над расплавом восстановительной защитной атмосферы из продуктов разложение метана.

На фурмах без испарительных камер применение природного газа в качестве газа-носителя невозможно из-за затягивания среза сопел (через 40-50 секунд после начала вдувания), связанного с охлаждением чугуна при разложении метана на выходе из сопла и отбором тепла.



**Заключение.** Процесс десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния без разубоживающих добавок через фурму с испарительной камерой на выходе наиболее экономичен, отличается высокой надежностью, эффективностью и стабильностью достигаемых результатов. Однако, усложнение реализации процесса при большой (более 2,6 м) глубине ванны, трудоемкость обслуживания испарительных камер, ограничения по интенсивности вдувания магния (около 10 кг/мин) и наполнению ковшей (0,5–0,6 м свободное пространство над расплавом), связанные с типом примененной фурмы стали причинами недостаточной универсальности процесса с использованием фурм с испарительными камерами. Это потребовало разработки рациональной конструкции фурм для условий обработки больших масс чугуна (130–300 т), когда необходимо за короткий цикл (около 10 минут) вдувать в раслав большое количество магния (100 – 200 кг).

Проведенные результаты исследований по изучению работы фурм различной конструкции без испарительных камер показали, что в наибольшей степени условиям обработки чугуна в большегрузных ковшах отвечают двухсопловые У-образные фурмы. Такие фурмы обеспечивают рациональные условия вдувания магния, а именно: устойчивую работу сопел фурмы без зарастания и закупоривания, спокойное и технологичное барбатирование чугуна в ковше, высокую интенсивность подачи магния при достаточно приемлемых расходах инжестирующего газа (0,10 – 0,15 нм<sup>3</sup>/т) за период вдувания магния. При этом обеспечиваются благоприятные условия для эффективного использования магния: расход магния на единицу удаленной серы составляет 1,1 – 2,4 кг/кг, степень использования магния на серу 27,0 – 50,3%.

1. *Воронова Н.А.* Десульфурация чугуна магнием. – М.: Metallurgia. – 1980. – 239 с.
2. *Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Баймаков А.М.* Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. – Киев. Наукова думка. – 2011. – 207 с.
3. *Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали.* Сб. докладов. Галати/Румыния. 18-21 сент. 2006. – 91 с.
4. *Создание и развитие рациональных технологий внепечной десульфурации чугуна.* / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, Лю Дун Ие и др.// Сталь. – 2009. – № 4. – С.13-20.
5. *Патент* України № 82304, МПК С21С 1/02 (2006.01). Фурма для десульфуратії чавуну зернистим магнієм у великовантажних ковшах. /Большаков В.И., Шевченко А.П., Остапенко О.В. [та ін.]; заявник та власник патенту Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України. – № а200704871; заявл. 03.05.2007; опубл. 25.03.2008, бюл. № 6.
6. *Оценка* влияния угла инжестирования затопленной струи на гидрогазодинамику барбатированной ванны. / С.А.Шевченко, А.П.Толстопят,

Т.А.Рузова, А.Ф.Шевченко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. – Вып.14. – 2007. – С.132–139.

7. *Патент* України № 86325, МПК (2009)С21С 1/02 (2006.01). Фурма для десульфурації чавуну зернистим магнієм у великовантажних ковшах. / Большаков В.І., Шевченко А.П., Остапенко О.В. [та ін.]; заявник та власник патенту Інститут чорної металлургії ім. З.І.Некрасова НАН України. – № а200800144; заявл. 02.01.2008; опубл. 10.04.2009, бюл. № 7.
8. *VII Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали*: сб. докладов. – Аниф - Австрия. 26-27 сентября 2002 г. – 115 с.

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

*А.П.Шевченко, Б.В.Двоскін, О.В.Остапенко, І.О.Маначин,  
С.О.Шевченко.*

**Порівняння параметрів роботи фурм різної конструкції для інжектування у чавун диспергованого магнію без добавок**

Проведено аналіз роботи та показано переваги і недоліки фурм різної конструкції для десульфурації чавуну. Визначено перспектива застосування двохсоплової фурми для вдування зернистого магнію та освоєння процесу десульфурації з високою швидкістю та ефективністю десульфурації.

**Ключові слова:** магній, чавун, десульфурація, чавун, магній, двохсоплова фурма

*A.F.Shevchenko, B.V.Dvoskin, A.V.Ostapenko, I.O.Manachyn,  
S.A.Shevchenko*

**Comparison of various parameters of the lance design for injection granulated magnesium in hot metal.**

The analysis of the lances of various designs for desulphurization. The advantages and disadvantages of each. The prospects use dvohsoplovoyi lance for blowing granular magnesium desulfurization process and the development of high speed and efficiency of desulfurization.

**Keywords:** desulphuration, iron, magnesium, two lance nozzles