



Е. В. Бурмистрова, Р. И. Абдрахманов (✉)

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск
Челябинской обл., Россия

УДК 666.76-127:621.746.329

ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ПРОДУВКИ МЕТАЛЛА АРГОНОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШАХ ОАО ММК*1

Приведена информация о видах огнеупорных изделий, используемых для продувки металла в сталеразливочных ковшах, принципах их эксплуатации и полученных результатах. На основе проведенного сравнительного анализа наиболее эффективной признана технология продувки стали аргоном в сталеразливочном ковше через донные пробки. В соответствии с этим для донной продувки в условиях ОАО ММК используются хорошо зарекомендовавшие себя при проведении испытаний изделия со сформированными радиально располагаемыми рабочими каналами.

Ключевые слова: продувка аргоном, сталеразливочный ковш, вакууматор, внепечная обработка стали, щелевые каналы, продувочные блоки.

Производство высококачественной стали требует освоения новых технологий и совершенствования конструкции оборудования, применяемого на всех этапах технологического процесса. Немаловажным фактором является подбор материалов, способных длительное время выдерживать воздействие металла и шлака при высоких температурах, а также изделий из них, обеспечивающих надежность в процессе эксплуатации.

За последние десятилетия в технологии черной металлургии прочно вошла тенденция ковшевой обработки стали. Продувка металла аргоном является важным звеном в технологии получения высококачественной стали. Основное назначение продувки инертными газами — оптимизация температурного и химического состава металла, удаление растворенных газов и неметаллических включений. Основным этапом использования донной продувки является внепечное рафинирование стали, проводимое на агрегатах внепечной обработки стали. Основная доля доводки металла в условиях кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) ОАО ММК производится именно на агрегатах внепечной обработки стали (ВОС), таких как УПК, АДС, УУПС, УВС. Полученный после выпуска из конвертера полупродукт требует достаточно длительных и трудоемких процес-

сов, прежде чем превратится в пригодную для конечной разливки сталь. Основными технологическими процессами, способствующими достижению требований чистоты и соответствия качества металла, являются возможность дополнительного электроподогрева на установках печь-ковш (УПК), а также продувка жидкой стали в сталеразливочном ковше инертным газом.

До 2000 г. в ККЦ доводку металла производили на агрегатах доводки стали (АДС) и установке усреднительной подготовки стали (УУПС). Дополнительный подогрев металла осуществляли методом химического нагрева, а принудительное перемешивание металла и его очистку от неметаллических включений — с помощью вдувания аргона через верхние фурмы. Доля вакуумированного металла в указанный период не превышала 5 % общего объема выпуска. Однако при дальнейшем развитии производства такие методы доводки не могли обеспечить требуемое качество металла. Проблема состояла в отсутствии возможности тонкой регулировки объема подаваемого инертного газа, поскольку образующиеся при верхней продувке газовые пузыри имели слишком большой размер (по диаметру рабочих сопел фурмы) и не могли эффективно очищать металл от неметаллических и газовых включений. Технология верхней продувки металла аргоном первоначально предусматривала использование фурм с защитным огнеупорным слоем, выполненным из штучных алюмосиликатных изделий. Эффективность таких фурм была невысока как по времени эксплуатации, так и по степени усреднения и очистки металла. Благодаря разработке и внедрению бетонных за-

*1 По материалам Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (4–5 апреля 2014 г., Москва).



Р. И. Абдрахманов
E-mail: Abdrakhmanov.RI@mmk.ru

Таблица 1. Сравнительный анализ методов продувки стали инертными газами в сталеразливочных ковшах ККЦ ОАО ММК

Сравниваемые показатели	Фурма для верхней продувки		Донная продувочная пробка
	монолитная	наборная	
Производительность одного изделия:			
мин	65	20	2200
плавки	6,5	2,5	40
Удельный расход огнеупоров, кг/т стали	0,21	0,46	0,03

ливных фурм появилась возможность повысить эффективность доводки стали за счет конструктивного решения технологии подачи аргона в расплав.

После ввода в 2000 г. в эксплуатацию в ККЦ двухпозиционной УПК производства «Фукс Системтехник» (LF), Германия, появилась возможность повысить качество подготовки металла за счет проведения следующих процессов: электронгрева жидкого металла в сталеразливочном ковше, десульфурации стали (наведение шлака в ковше), корректировки химического состава стали (введение легирующих материалов) и последующего усреднения ее состава и температуры продувкой аргоном через пористые продувочные блоки, устанавливаемые в дно сталеразливочных ковшей.

Внедрение технологии донной продувки значительно расширило технологические возможности агрегатов ВОС, а также позволило значительно снизить удельный расход огнеупорных материалов (табл. 1). Продувка инертного газа через донные пробки превзошла верхнюю продувку качеством перемешивания

металла без образования застойных зон на дне сталеразливочного ковша (рис. 1). Принимая во внимание рабочий объем сталеразливочного ковша ККЦ (385 т), для получения оптимального результата усреднения металла было решено установить два продувочных блока, расположенных в левой зоне ковша (см. рис. 1); наклон фурмы от вертикали 9°. Расположение пробок, а также расстояние между ними было определено таким образом, чтобы обеспечить максимальную площадь продувки металла инертным газом и образовать достаточно организованный поток перемешивания металла. Кроме того, указанная зона установки была выбрана с учетом конструктивных особенностей оборудования. Последующая эксплуатация сталеразливочных ковшей, оборудованных донной продувкой, подтвердила правильность выбора. Степень усреднения стали по температуре и химическому составу при использовании донных пробок в среднем составила 0,95 (оценка производилась по температуре и качеству металла в начале и конце разливки). При использовании верхней продувки через погружаемые фурмы придонные слои металла перемешивались недостаточно равномерно и степень усреднения едва достигала 0,80, так как расстояние от нижнего среза фурмы до горизонта дна составляло не менее 500 мм (см. рис. 1).

Устанавливаемые в дне сталеразливочных ковшей донные продувочные блоки должны быть надежными в жестких условиях эксплуатации. К ним предъявлялись специфические требования, такие как постоянство расхода газа при заданном диапазоне давлений, возможность обслуживания и контроля скорости износа.

Особенности эксплуатации. Основным методом обслуживания донных продувочных блоков, устанавливаемых в сталеразливочных ковшах ККЦ ОАО ММК, является очистка рабочей поверхности пробки методом противоточка после разливки металла, когда через пробку продувается природный газ, позволяющий тестировать работоспособность продувочной пробки по наличию факела. При его отсутствии

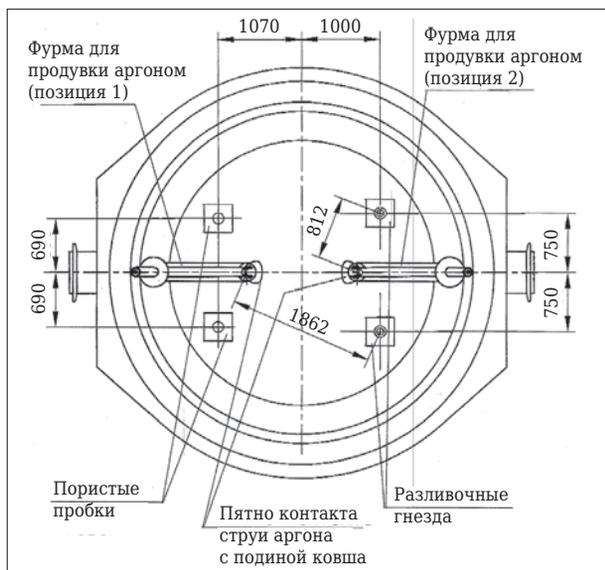


Рис. 1. Схема позиционирования фурм для верхней продувки и установки продувочных блоков в дне сталеразливочных ковшей

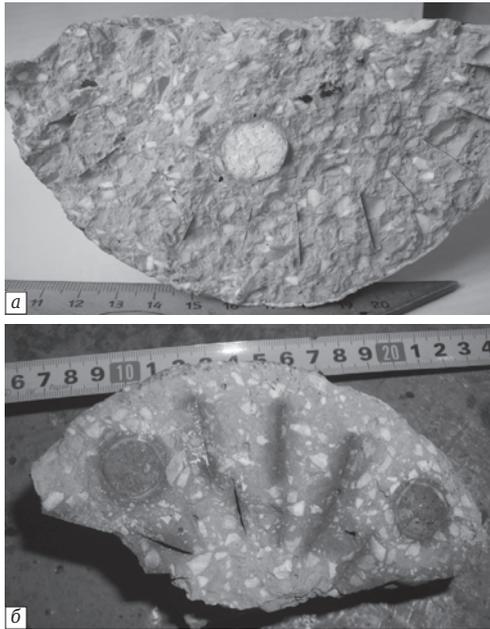


Рис. 2. Фрагмент продувочной пробки после эксплуатации: *а* — не загрязненной сажистыми отложениями; *б* — со следами сажистых включений

зоны установки блоков для продувки стали аргоном обрабатывают кислородной пушкой, позволяющей провести частичную очистку рабочей поверхности пробки от образовавшейся настлы. Однако в процессе обработки зачастую получается обратный эффект — вместо очистки пробки от настлы и улучшения продуваемости происходит частичное забивание рабочих каналов с последующим ухудшением продувки. Причина кроется в значительной разнице давлений природного газа и кислорода. Максимальное давление природного газа не превышает 6 бар. В то же время кислород подается на пушку под давлением не менее 10 бар (при отсутствии возможности тонкой регулировки), поскольку его используют для очистки каналов сталевыпускных блоков. Разница в давлении приводит к образованию коксующих включений в рабочих продувочных каналах и последующему ухудшению качества продувки. Даже при визуальном осмотре отработавших пробок наличие сажистых включений легко определяется по изменению цвета тела пробки — от розовато-белого до различных оттенков серого (рис. 2). Наличие углерода в пробке подтверждается результатами рентгеноспектрального микроанализа (рис. 3). Кроме сажистых образований в рабочих каналах продувочных пробок обнаружены пластинки железа, содержащие легирующие добавки (рис. 4).

Продувочные пробки находятся под давлением только при подключении и продувке

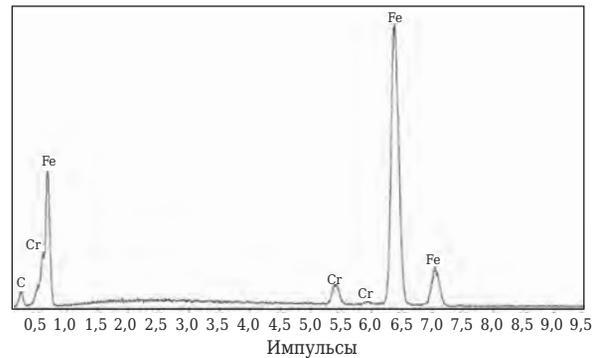


Рис. 3. Рентгенограмма анализа отложений в рабочих каналах продувочной пробки

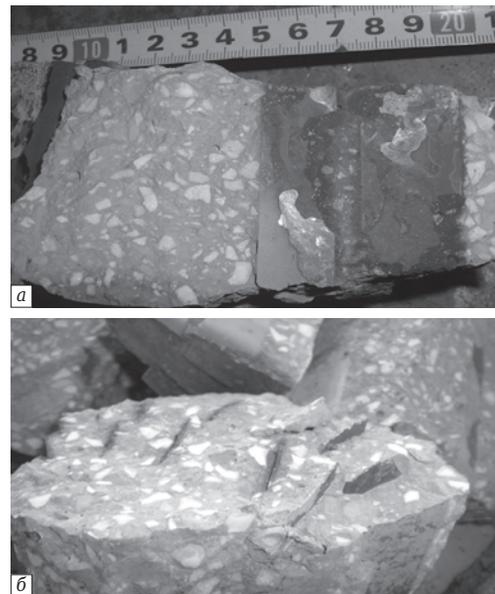


Рис. 4. Фрагменты (*а, б*) продувочных пробок с металлическими включениями в продувочных каналах

стали газом на агрегатах внепечной обработки стали. Однако в момент слива металла в сталеразливочный ковш из конвертера велика вероятность инфильтрации жидкой стали в продувочные каналы, последующего затвердевания в глубине пробки и ухудшения ее последующей работоспособности. Это предположение подтверждается результатами контроля состояния продувочных пробок после службы (см. рис. 4). Вероятность проникновения инфильтрата в продувочные каналы пробок может быть определена с учетом нескольких важных параметров — поверхностного натяжения стали, краевого угла смачивания, размеров продувочного канала и ферростатического давления. Определение размера продувочных каналов явилось одной из значимых задач, решенных в условиях ККЦ ОАО ММК.

С использованием общеизвестных параметров, требуемых для определения толщины

Таблица 2. Сравнительный анализ эффективности продуваемости донных пробок различной конструкции (с учетом усреднения технологических факторов)

Показатели сравнения	Серийные пробки	Опытные I (конструкция № 1)	Опытные II (конструкция № 2)
Эффективность продуваемости, %	87,4	90,8	96,8
Время продувки одной плавки, мин	52,2	51,8	62,0
Общая продуваемость, мин	2084	2148	2468
<i>Конструктивные особенности</i>			
Число продувочных каналов	54	24	74
Наличие дополнительных продувочных элементов	—	3 бара diam. 15 мм	8 бар diam. 15 мм
Толщина каналов, мм	0,19	0,20	0,15
<i>Причины ухудшения продувки</i>			
Ресурс продувки, %	37,2	27,7	45,5
Нестабильность эксплуатации, %	41,5	49,6	36,6
Подготовка ковша, %	7,7	8,8	11,4
Технологическая подготовка металла, %	6,5	5,8	4,5

щели d для сталеразливочных ковшей ККЦ, были рассчитаны ее оптимальные размеры*2:

$$d = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho gh} \cdot 1000000,$$

где σ — поверхностное натяжение стали (1,7 Н/м); ρ — плотность стали (7100 кг/м³); g — ускорение свободного падения (9,8 м/с²); θ — краевой угол смачивания ($\cos\theta = 0,97$); h — высота гидростатического давления стали (4,8–5,0 м).

По этой формуле была рассчитана оптимальная толщина продувочных каналов, которая составила 0,188–0,195 мм. Последующие испытания подтвердили эти расчетные показатели. Наиболее стабильные результаты продувки получены при использовании донных продувочных пробок, толщина каналов которых максимально приближена к расчетным значениям (табл. 2).

С 2006 г. в условиях ККЦ применяли донные продувочные блоки с 54 радиально сформированными каналами, расположенными по двум окружностям (рис. 6). При соблюдении условий эксплуатации эффективность донных продувочных блоков такой конструкции составляет 88–90 %. Однако воздействие отрицательных факторов — отсутствие своевременного подключения аргона, кратковременное выведение ковшей из оборота, нестабильность давления аргона в магистрали и т. д. — заметно снижает качество продувки независимо от типа продувочных блоков (см. табл. 2).

В 2012 г. были проведены испытания изделий, в конструкции которых кроме щелевых

*2 Шварц, К. Изучение проникновения жидкого металла в продувочные пробки / К. Шварц, О. Краус // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 4/5.

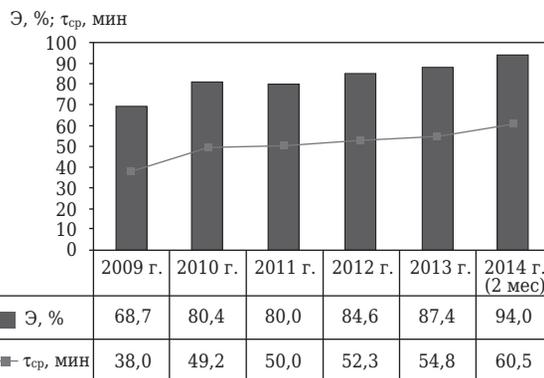


Рис. 5. Эффективность использования донной продувки в условиях ККЦ ОАО ММК



Рис. 6. Продувочные пробки с радиальным расположением продувочных каналов

каналов дополнительно имеются цилиндрические вставки с пористой структурой. Кроме того, эффективную работоспособность показали продувочные блоки, оборудованные двумя пробками (рис. 7). Основной объем продувки осуществляется через щелевые каналы, размер которых составляет 0,15 мм. Кроме того, имеющиеся в пробке 4 пористые цилиндрические вставки также имеют ориентированную

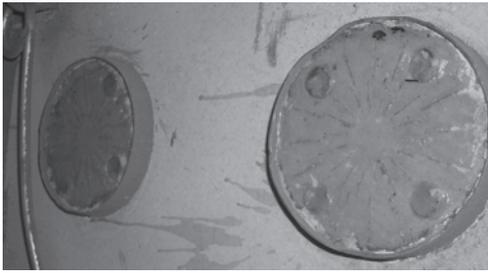


Рис. 7. Блок с двумя продувочными пробками для продувки стали аргоном



Рис. 8. Вид ориентированных каналов пористой вставки

структуру (рис. 8). Опыт эксплуатации донных продувочных систем (установочный блок + продувочная пробка) различных конструкций, а также анализ параметров эксплуатации показали, что в условиях ККЦ ОАО ММК эффективность продувки в большей степени зависит от условий использования и обслуживания (рис. 9). Анализируя полученную в ходе серийного использования информацию, а также руководствуясь опытом многочисленных испытаний донных продувочных блоков различных конструкций, можно сделать следующие выводы:

- отсутствие системы подачи аргона в продувочные пробки в момент выпуска металла из конвертера приводит к проникновению металла в каналы пробки и в последующем может явиться причиной снижения эффективности продувки;

- нестабильность эксплуатации сталеразливочных ковшей (выведение из оборота с установкой в стенд разогрева на длительный срок, длительный межплавочный простой с остыванием футеровки, длительное нахождение металла в ковше без подключения донной



Рис. 9. Диаграмма распределения причин, влияющих на качество донной продувки

продувки) является основной причиной ухудшения продуваемости;

- отсутствие или неудовлетворительное качество проведения тестирования пробки после разлива металла приводит к забиванию рабочих каналов посторонними включениями и временному прекращению или значительно ухудшению донной продувки;

- в случае нестабильности давления инертного газа в магистрали отмечается снижение эффективности продувки;

- жесткие условия эксплуатации — длительность продувки плавки на агрегатах внепечной обработки стали, длительность выдержки металла в сталеразливочном ковше, методы обслуживания и технология эксплуатации — приводят к ресурсному прекращению продувки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайшем будущем в условиях ОАО ММК планируется внедрить ряд проектов, которые позволят снизить влияние отрицательных факторов и достигнуть 100 %-ной эффективности донной продувки в условиях ККЦ. Наиболее перспективно внедрение системы с заменяемыми продувочными пробками. Такая модель продувочной системы позволит производить своевременную замену пробки независимо от стойкости футеровки сталеразливочного ковша и обеспечит донную продувку практически на уровне 100 % независимо от условий эксплуатации. ■

Получено 09.04.14
© Е. В. Бурмистрова, Р. И. Абдрахманов, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



VI международный конгресс и выставка «Цветные металлы-2014»

16–19 сентября 2014 г.

г. Красноярск, Россия

<http://nfmsib.ru/>