

обеспечения качества обработанных поверхностей при точении с асимметричными колебаниями инструмента / В. К. Шелег, В. И. Молочко, С. С. Данильчик // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение. 2015. – № 3. – С. 19–24.

4. Хлудов, С. Я. Теория проектирования сменных многогранных пластин с рациональной геометрией для чистового точения с дроблением стружки: диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / С.Я. Хлудов. – Тула, 2007. – 487 с.

5. Хайкевич, Ю. А. Повышение эффективности чистового точения на основе выбора рациональной конструкции сменных многогранных пластин при прогнозировании процесса дробления стружки: диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. А. Хайкевич. – Тула, 2009. – 183 с.

УДК 621.52:669.18

**Газовые потоки в технологиях вакуумной обработки жидкой стали**

**Корнеев С. В., к. т. н., доцент**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация:

В работе рассмотрены конструктивные и технологические особенности вакуумных установок обработки жидкой стали в металлургическом производстве. Определены газовые потоки при использовании различных технологий вакуумной обработки.

В состав отделений внепечной обработки стали современных электросталеплавильных цехов входят циркуляционный и камерный (ковшевой) вакууматоры. Вакуумная обработка стали также используется и в кислородно-конверторных цехах при производстве стали из жидкого чугуна и последующей внепечной обработке. Несмотря на то, что различных способов и вакуумных установок, разработанных в разное время более десятка, основными являются указанные два типа с различными модификациями.

Ежегодно в мире вводится в эксплуатацию более десятка установок вакуумирования жидкой стали. При этом около 60 % из них приходится на установки ковшевого, а 40% циркуляционного типа. Работа установок характеризуется наличием значительных газовых потоков, которые необходимо откачивать многоступенчатыми вакуумными насосами. При этом для выбора установок и оптимизации процесса вакуумной откачки необходимо знать распределение газовых потоков по источникам происхождения, а также диапазон колебания их количества в зависимости от выбранной технологии и времени работы. В последние годы наметилась тенденция в переходе от парожеткорных вакуумных установок к механическим вакуумным насосам, что также требует анализа параметров газовых потоков.

### **Вакуумные установки RH и VD**

Установка вакуумной обработки стали циркуляционным способом (RH) предназначена для обработки жидкой стали в вакууме с целью дегазации (вредными газами для большинства сталей являются водород и азот). Кроме газов при вакуумной обработке дополнительно удаляются в виде пара примесные металлы и, кроме того, образуются пылевые частицы в результате подачи материалов и разбрызгивания жидкой стали в процессе обработки. Вакуумная обработка стали производится в вакуумной камере, футерованной огнеупорным кирпичом и располагающейся над ковшом, заполненным жидкой сталью. В нижней части вакуум-камеры (RH) расположены два футерованных патрубка, которые погружаются в сталь и далее через них происходит циркуляция металла. Для производства стали с особо низким содержанием углерода вакуумные установки RH имеют модификации с оснащением их фурмами для продувки кислородом RH-OB (oxygen blowing), а для производства сталей более широкого сортамента комбинированными фурмами RH/T-COB. На рис. 1 представлена схема вакуумной установки циркуляционного типа RH с фурмой комбинированного дутья, а на рисунке 1 2 фотоизображение вакууматора RH.



Рис. 1. Схема циркуляционного вакууматора RH с фурмой комбинированного дутья



Рис. 2. Изображение циркуляционного вакууматора RH в процессе вакуумирования стали

Установка вакуумной обработки стали VD (Vacuum Degassing) предназначена для обработки жидкой стали в вакууме, посредством генерации глубокого вакуума в камере, в которую установлен ковш с жидким металлом. Дополнительно в вакууме или при атмосферном давлении производится коррекция анализа химического состава металла посредством добавки легирующих материалов, с одновременным перемешиванием стали в ковше. Это достигается посредством ввода аргона в сталь через пористые огнеупорные продувочные пробки. Устройство вакууматора VD представлено на рисунке 3.

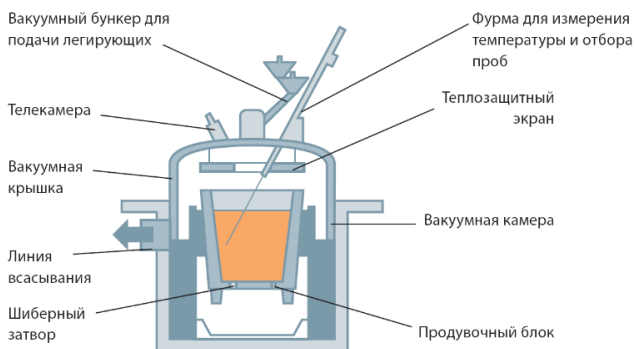


Рис. 3. Схема камерного вакууматора VD

При необходимости снижения содержания углерода при использовании камерного вакууматора в конструкцию добавляют фурму и другое оборудование для продувки металла кислородом (рисунки 4 и 5). VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation – вакуум-кислородное обезуглероживание) – продувка кислородом металла, находящегося под вакуумом (в вакуумной камере).

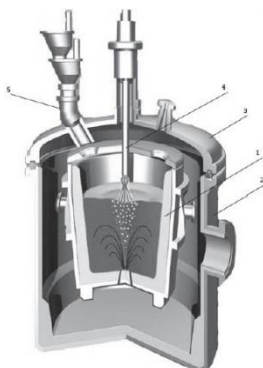


Рис. 4. Схема камерного вакууматора VD/VOD: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – вакуумная камера; 3 – крышка вакуумной камеры; 4 – кислородная фурма; 5 – устройство для подачи сыпучих материалов



Рис. 5. Изображение камерного вакууматора VD/ VOD с приоткрытой крышкой

Масса обрабатываемых на вакуумных установках плавков на предприятиях металлургического профиля обычно составляет 20-350 тонн (для конкретного предприятия обычно близко к постоянной величине, зависящей от используемых ковшей). При данных массах металла, температурах металла и разряжении в вакуумных камерах объемные потоки газов могут превышать 1 млн. м<sup>3</sup>/ч.

Рассмотрим газовую нагрузку при различных технологиях вакуумной обработки стали.

При снижении давления над расплавом из стали интенсивно начинают выделяться потоки водорода и азота, которые являются технологическими. Для интенсификации процесса в вакууматорах камерного типа требуется перемешивание стали в ковше при помощи аргона, подаваемого через пористые пробки в днище ковша. При этом сама продувка даже без вакуумной обработки способствует снижению содержания водорода и азота, но в меньшей степени и медленнее чем при вакуумной обработке. Количество аргона необходимого для продувки в камерном вакууматоре в большой степени определяется условиями разбрызгивания металла (свободный борт ковша при обработке в камерном вакууматоре должен быть от 500 до 1500 мм).

При использовании вакууматора циркуляционного типа RH металл всасывается из ковша в вакуумную камеру поэтому уровень металла в ковше при подаче на вакуумирование может быть значительно выше чем при обработке в вакууматоре камерного типа. Однако для осуществления циркуляции металла на установке RH в один из патрубков подают значительное количество аргона, существенно

превышающее количество аргона на продувку ковша в камерном вакууматоре VD.

Помимо указанных газовых потоков в вакуумных установках дегазации требуется обеспечить подачу защитных газов (воздух, азот) для камер наблюдения. Значительные величины газовых потоков на установках дегазации стали образуются также в результате натекания в систему воздуха.

При использовании вакуум-кислородного обезуглероживания с подачей кислорода на установках RH-OB и VOD появляются значительные потоки угарного газа CO, который также является технологическим газом.

Используя различные литературные данные и технологические инструкции по внепечной обработке были определены газовые потоки с распределением их по типу технологического процесса, которые представлены ниже.

#### **Технология вакуумной дегазации в камерном (ковшовом) вакууматоре VD.**

1) Аргон, подаваемый на продувку ковша (1–8 ндм<sup>3</sup>/(т·мин)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_{Ar} = (1 \cdot 100 \cdot 60 - 8 \cdot 100 \cdot 60) = 6000 - 48000 \text{ ндм}^3/\text{ч} = 6 - 48 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

2) Удаляемый из жидкого металла газ H<sub>2</sub> (6–30 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_H = (6 \cdot 100 / 0,09 / 1000 - 30 \cdot 100 / 0,09 / 1000) = 6,7 - 33,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

3) Удаляемый из жидкого металла газ N<sub>2</sub> (60–300 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_N = (60 \cdot 100 / 1,25 / 1000 - 300 \cdot 100 / 1,25 / 1000) = 4,8 - 24,0 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

4) Воздух, подаваемый в качестве защитного газа для видеокмеры 10–20 нм<sup>3</sup>/ч

5) Натекание воздуха при откачке (25–50 кг/ч)

$$V_v = (25 / 1,21 - 50 / 1,21) = 20,7 - 41,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

#### **VOD-вакуум-кислородное обезуглероживание в камерном (ковшовом) вакууматоре**

1) Аргон, подаваемый на продувку ковша (0,5–5 ндм<sup>3</sup>/(т·мин)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_{Ar} = (0,5 \cdot 100 \cdot 60 - 5 \cdot 100 \cdot 60) = 3000 - 30000 \text{ ндм}^3/\text{ч} = 3 - 30 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

2) Удаляемый из жидкого металла газ H<sub>2</sub> (количество аналогично установке VD). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_H = 6,7 - 33,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

3) Удаляемый из жидкого металла газ  $N_2$  (количество аналогично установке VD). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_N = 4,8-24,0 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

4) Угарный газ CO, получаемый в результате продувки стали кислородом и ее обезуглероживания (6000–12000 гC/(т·ч)) Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_{CO} = (6000/1000 \cdot 28/12/1,145 \cdot 100 - 12000/1000 \cdot 28/12/1,145 \cdot 100) = 1222,7-2445,4 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

5) Воздух, подаваемый в качестве защитного газа для видеокамеры  $V_{вз} = 10-20 \text{ нм}^3/\text{ч}$

6) Натекание воздуха при откачке (25–100 кг/ч)  $V_v = (25/1,21 - 100/1,21) = 20,7-82,6 \text{ нм}^3/\text{ч}$

### **Технология вакуумной дегазации на вакууматоре циркуляционного типа RH**

1) Аргон, подаваемый на продувку/циркуляцию стали (30–180 нм<sup>3</sup>/ч).

2) Азот, подаваемый в качестве защитного газа для камеры наблюдения (1–15 нм<sup>3</sup>/ч).

3) Удаляемый из жидкого металла газ  $H_2$  (6–30 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_H = 6,7-33,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

4) Удаляемый из жидкого металла газ  $N_2$  (60–300 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_N = 4,8-24,0 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

5) Натекание воздуха при откачке (50–100 кг/ч)  $V_v = (50/1,21 - 100/1,21) = 41,3-82,6 \text{ нм}^3/\text{ч}$

### **Технология вакуумного обезуглероживания на установке RH-OB**

Аргон/Продувочный газ 30–180 м<sup>3</sup> (при н. у.)/ч

1) Аргон, подаваемый на продувку/циркуляцию стали (30–180 нм<sup>3</sup>/ч).

2) Азот, подаваемый в качестве защитного газа для фурмы (160 нм<sup>3</sup>/ч).

3) Удаляемый из жидкого металла газ  $H_2$  (6–30 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_H = 6,7-33,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

4) Удаляемый из жидкого металла газ  $N_2$  (60–300 г/(т·ч)). Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_N = 4,8-24,0 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

5) Угарный газ CO, получаемый в результате продувки стали кислородом и ее обезуглероживания (1200–3000 гC/(т·ч)) Для емкости ковша 100 тонн расход составит

$$V_{CO} = (1200/1000 \cdot 28/12/1,145 \cdot 100 - 3000/1000 \cdot 28/12/1,145 \cdot 100) = 244,5 - 611,4 \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

б) Натекание воздуха при откачке (75–150 кг/ч)  $V_v = (75/1,21 - 150/1,21) = 62 - 124 \text{ нм}^3/\text{ч}.$

УДК 621.521

## **Особенности вакуумных систем устройств сканирующей электронной микроскопии**

**Корнеев С. В., к.т.н., доцент**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация:

Рассматриваются вакуумные системы современных устройств сканирующей электронной микроскопии и особенности их построения для реализации дополнительных функций, расширяющих диапазон проводимых исследований.

Устройства сканирующей электронной микроскопии состоят из следующих основных элементов: источника электронов, системы электронных линз, камеры с образцом и различных детекторов. Изображение в сканирующих электронных микроскопах формируется путем сканирования поверхности сфокусированным пучком электронов и фиксации сигналов, содержащих информацию о форме поверхности и составе образца. На пути электронного пучка из источника электронов к образцу не должно быть посторонних примесей в виде молекул газов, поэтому в устройствах электронной микроскопии создают и поддерживают вакуум, требования к которому несколько различаются в зависимости от вида микроскопа и проводимых на нем исследований.

Изображение сканирующего электронного микроскопа представлено на рис. 1.

Современные микроскопы в зоне источника электронов должны обеспечивать сверхвысокий вакуум на уровне менее  $10^{-9}$  мбар.

Для получения сверхвысокого вакуума вакуумная система должна оснащаться электрофизическим насосом (например, ионно-