

УДК 669.18.046.517–982:621.746.5

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ АГРЕГАТОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Ф. ДОРШТЕВИЦ, Д. ТЕМБЕРГЕН*

Благодаря своей универсальности вакуумирование занимает особое место среди процессов внепечной обработки стали, особенно при производстве высокоценных марок. Средний вакуум в современных высокоэффективных агрегатах внепечной обработки создается парозежекторными или механическими насосными системами. При выборе определенной системы, кроме собственно технологической задачи и удельных производственных затрат, компании-оператору необходимо рассматривать и оптимизацию системы в целом, включая вспомогательное оборудование. В данной статье описаны общие технические требования к вакуумным насосам, используемым с агрегатами внепечной обработки стали.

Ключевые слова: вакуумные насосы, механические и парозежекторные насосы, вакуумирование, камерные и циркуляционные вакууматоры, технические характеристики, коррозионностойкая сталь.

В 1970-х годах ряд технологических операций по обработке жидкой стали были вынесены из плавильного агрегата в сталеразливочный ковш. Сначала эти операции получили название «ковшовая металлургия», а в настоящее время они называются внепечной обработкой стали или внепечным рафинированием. Различаются процессы рафинирования, проводимые при атмосферном давлении, и процессы, проводимые под вакуумом.

Процессы вакуумирования подразделяются на камерные и циркуляционные.

Изначально процесс циркуляционного (RH — Ruhrstahl-Heraeus) вакуумирования задумывался для удаления водорода из металла (рис. 1). Затем к нему были добавлены новые функциональные возможности. Так, в процессе RH-вакуумирования кислород подается на поверхность циркулирующего жидкого металла через водоохлаждаемую фурму.

В отличие от циркуляционного, при камерном (VD) вакуумировании под воздействием вакуума оказывается весь металл в ковше (рис. 2).

В VD-вакууматорах для продувки кислородом под вакуумом используется водоохлаждаемая фурма. При использовании кислородной фурмы для алюминотермического нагрева процесс носит название VD-ОВ-вакуумирования (ОВ —

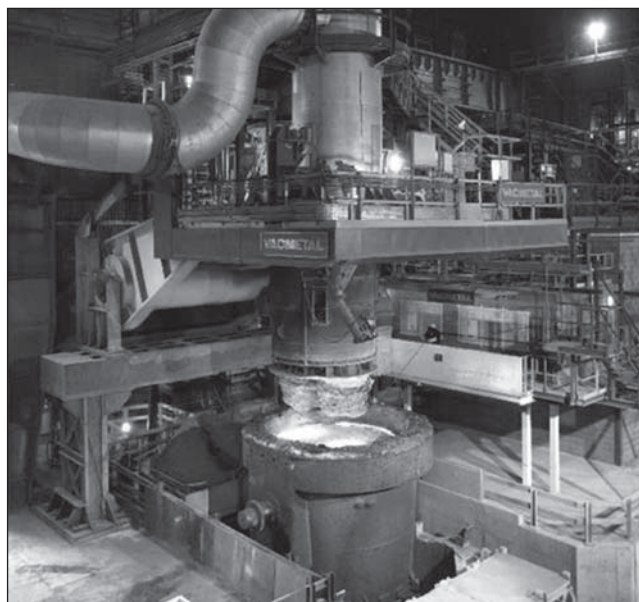


Рис. 1. Однопозиционный RH-вакууматор на комбинате компании ArcelorMittal Eisenhüttenstadt (Фото: sms mevac)

Оxygen Blowing — продувка кислородом). Процесс вакуумно-кислородного обезуглероживания (VOD-вакуумирование) позволяет при производстве коррозионностойких марок стали вести продувку кислородом под вакуумом в течение длительного времени.

При сравнении емкости ковшей, используемых при RH- и VD-вакуумировании, можно отметить, что более половины циркуляционных агрегатов, построенных во всем мире, работают с ковшами емкостью более 180 т. Самый маломощный агрегат, построенный в начале 1990-х годов, работает

* Докт.-инж. Ф. Дорштевиц, руководитель технологического отдела; дипл. инж. Д. Темберген, руководитель металлургического отдела, компания SMS Mevac GmbH, Эссен; dieter.tembergen@sms-mevac.com



Рис. 2. Двухпозиционный VD-вакууматор № 1 на комбинате в Шанхае (Фото: sms mevac)

с 80-тонными ковшами. Ввиду конструктивных и геометрических особенностей RH-вакууматоров это значение является нижней границей при их проектировании. И наоборот, VD-вакууматоры могут работать с ковшами емкостью до 10 т и менее. Для VOD-вакууматоров, предназначенных для производства коррозионностойких сталей, характерны ковши емкостью от 30 до 160 т. Однако почти 30 % вновь вводимых в эксплуатацию агрегатов работают с ковшами емкостью менее 75 т. Более 80 % VD-вакууматоров, введенных в эксплуатацию с начала 1990-х годов, работают с ковшами емкостью менее 150 т. RH-вакууматоры используются в кислородно-конвертерных цехах с высокой производительностью. В настоящее время в новых кислородно-конвертерных цехах, предназначенных для массового производства, масса плавки в основном более 250 т. Распределение установок вакуумирования по емкости ковшей показано на рис. 3.



Рис. 3. Распределение вакууматоров по массе обрабатываемых плавков

Технологические требования к насосным системам агрегатов внепечной обработки стали

В зависимости от технологической задачи, решаемой при обработке большинства обычных плавков массой от 20 до 350 т, насосные системы должны обеспечивать производительность в диапазоне от 100 до 1200 кг/ч при давлении ниже 1 мбар. Из-за пониженной плотности газа в указанном диапазоне давлений вакуумирование стали характеризуется необычно большими (по сравнению с другими промышленными вакуумными системами) объемными потоками выделяющегося технологического газа, превышающими 1 млн. м³/ч, который необходимо откачать и сконденсировать.

При этом конструкция вакуумных насосов должна соответствовать конкретным производственным условиям и индивидуальным требованиям целевой производственной программы и структуры производственных затрат компании-оператора.

Для эффективного вакуумирования требуется короткая продолжительность и высокая производительность при рабочих давлениях на входе в насосную систему ниже 1 мбар. При этом требуемое рабочее давление преимущественно должно достигаться в течение заданного времени откачки (около 5–7 минут) и, по возможности, оставаться постоянным в ходе обработки плавки независимо от объемов выделяющихся технологических газов. Типичная характеристика откачки для вакуумирования металла на агрегате камерного типа показана на рис. 4, а. Следует отметить, что точное регулирование снижения давления или давления вакуумирования необходимо для обеспечения высоких показателей надежности технологического процесса.

В настоящее время при естественном обезуглероживании металла в RH-О-вакууматорах давление вакуумирования менее 10 мбар должно достигаться менее чем за 5 мин. Характеристика откачки при обезуглероживании в RH-О-вакууматорах показана на рис. 4, б.

Кроме указанных технологических требований, следует обращать внимание на соответствующее условиям сталеплавильного цеха исполнение насосной системы (коэффициент готовности и удобство для технического обслуживания). По мере эксплуатации вакууматора объем натекания в системе возрастает, поэтому необходимо предусмотреть определенный

запас по производительности насоса с целью предотвращения незапланированных помех и перебоев в работе агрегата.

Объемы и химический состав газов при вакуумировании стали

Объемы и химический состав газов, выделяющихся при вакуумировании, можно определить с достаточной точностью. Кроме газообразных продуктов вакуумирования (водород, азот и монооксид углерода), необходимо учитывать влияние на объем и состав отходящего газа следующих факторов: использование защитного газа (воздух, азот или аргон) для зондов в рабочем пространстве агрегата; наличие продувочного газа (аргона или азота); привнесение воздуха за счет натекания; образование диоксида углерода при реакции монооксида углерода с кислородом (например, при продувке); наличие воздуха в различных емкостях самого агрегата.

Объем и химический состав отходящих газов существенно изменяются по ходу цикла вакуумирования и в зависимости от рабочего давления. Как правило, реакции дегазации внутри рабочей камеры начинаются при давлении около 400 мбар. Это относится ко всем описанным выше процессам RH-, RH-O-, VD-, VD-OB- или VOD-вакуумирования. При давлении в камере около 400 мбар объем и химический состав отходящего газа определяются объемом агрегата. Ниже этого значения они определяются типом металлургического процесса, реализуемого на данном вакууматоре. Объемы газов, выделяющиеся при обычных металлургических операциях и служащие основой для расчета производительности насосной системы, приведены в табл. 1.

Вновь вводимые агрегаты вакуумирования отличаются весьма низкими объемами натекания. При длительной эксплуатации, в зависимости от степени загрузки агрегата и проведения технического обслуживания и ремонтов, значения натекания могут значительно превышать представленные в табл. 1. Для газа, используемого для защиты камер наблюдения, учитывалось использование зондов в том или ином агрегате. В современных вакууматорах они уже являются стандартным оборудованием.

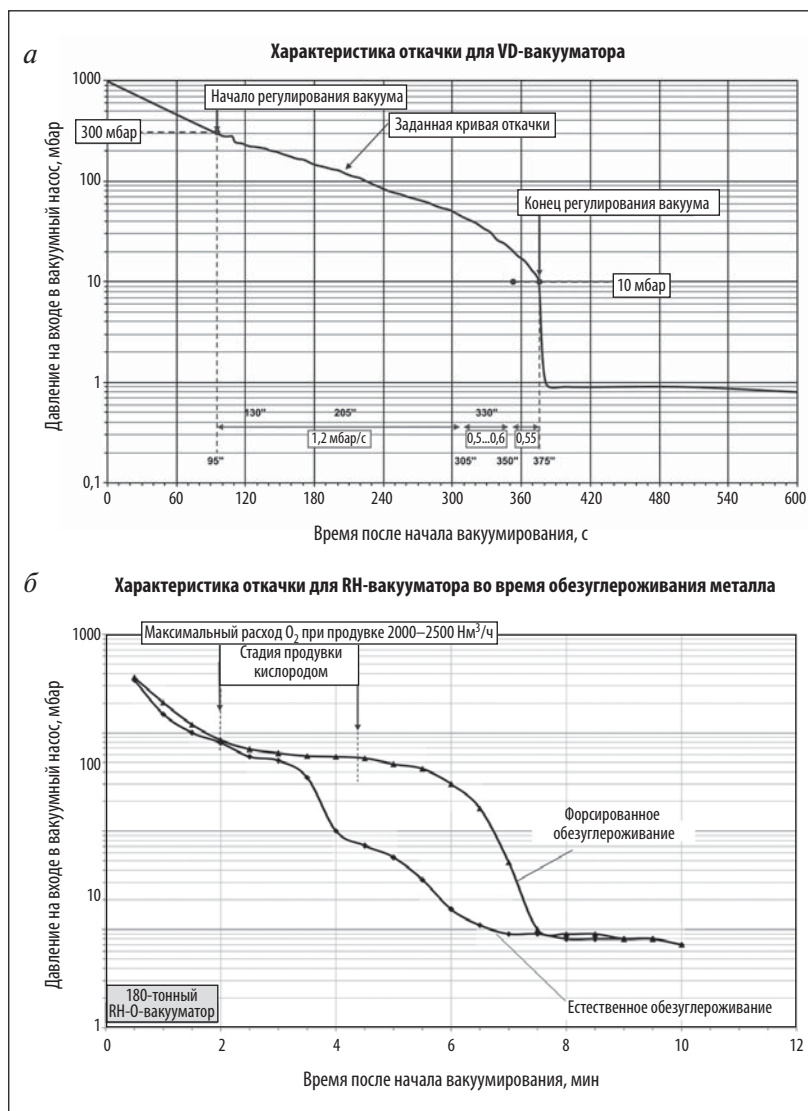


Рис. 4. Характерное снижение давления в VD-вакууматоре при дегазации (а) и при обезуглероживании металла в RH-вакууматоре (б)

Скорость натекания и использование зондов имеет особое значение при расчете производительности механических насосов, как будет показано ниже.

Производительность парожеторного насоса для агрегатов вакуумирования стали

Парожеторный насос осуществляет передачу массовых потоков. При его конструировании решающее значение имеет эффективная производительность в кг_{эф}/ч. Она показывает ту производительность вакуумного насоса, которая обеспечивает перекачку воздуха с молярной массой 29 кг/моль при температуре 20 °С.

Пересчет массовых потоков происходит в два этапа. На первом этапе каждый газ пересчитывается в его воздушный эквивалент (кг_{эф}/ч). Коэффициенты пересчета приведены в табл. 2.

Таблица 1.

Объемы технологических газов

	Камерный тип		Циркуляционный тип	
	VD-вакуумирование (Н)	VOD-вакуумное рафинирование Обезуглероживание	RH-вакуумирование (Н)	RH-O-обезуглероживание Вакуумирование (Н)
Аргон/Продувочный газ	1–8 дм ³ (при н. у.)/(т·мин) ¹⁾	0,5–5 дм ³ (при н. у.)/(т·мин) ¹⁾	30–180 м ³ (при н. у.)/ч ¹⁾	
Азот/Защитный газ для камеры наблюдения			1–15 м ³ (при н. у.)/ч ²⁾	
Азот/Защитная фурма				160 м ³ (при н. у.)/ч
H ₂ /Технологический газ ⁴⁾	6–30 г Н/(т·ч) ¹⁾		6–30 г/(т·ч) ¹⁾	
N ₂ /Технологический газ ⁴⁾	60–300 г N/(т·ч) ¹⁾			
СО/Технологический газ		6000–12000 г С/(т·ч) ²⁾		1200–3000 г С/(т·ч) ¹⁾
Воздух/Защитный газ для видеокамеры	10–20 м ³ (при н. у.)/ч			
Воздух/Натекание, кг возд/ч	25–50 ³⁾	25–100 ³⁾	50–100 ³⁾	75–150 ³⁾

¹⁾ В зависимости от конструкции агрегата вакуумирования, заданных технологических параметров и массы плавки.
²⁾ В зависимости от свободного борта ковша и компоновочной схемы вакуумного насоса.
³⁾ В зависимости от конструкции агрегата вакуумирования и от массы плавки.
⁴⁾ Давление в камере у поверхности металла — менее 8 мбар.

Чем выше молярная масса, тем меньше энергии требуется пароежекторному насосу для ускорения газа. Общий воздушный эквивалент получается при сложении пересчитанных массовых потоков для всех газов.

На втором этапе учитывается влияние температуры на массовый поток. Чем выше температура, тем более энергоемкой оказывается газовая смесь на входе в вакуумный насос.

Значения производительности при давлении 0,67 мбар на входе в пароежекторный насос в зависимости от процесса вакуумирования, массы плавки и технологической операции приведены в табл. 3.

В случае нестандартных технологических требований необходимо периодически перепроверять и корректировать производительность пароежекторного насоса.

Производительность механического насоса для агрегатов вакуумирования стали

Механический вакуумный насос осуществляет передачу объемных потоков. Для конструирования решающее значение имеет рабочий объемный расход в м³/ч. На рис. 5 приведены расчетные значения производительности для механических насосов VD- и VD-VOD-вакууматоров при давлении на входе в насос 0,67 мбар. Кроме выделения технологических газов, следует учитывать и натекание, обусловленное конструкцией агрегата. Натекание в диапазоне 25–50 кг/ч не является редкостью в производственной практике. В частности, на малотажных VD- и VD-VOD-вакууматорах с массой

плавки менее 80 т необходимо использовать конструктивные решения, позволяющие избежать существенного натекания. Кроме того, в данном случае невозможно использование зондов для контроля технологического процесса, которыми в настоящее время комплектуются вакууматоры.

В настоящее время практическое применение механических насосов ограничивается VD- и VOD-вакууматорами с массой плавки не более 180 т, при этом большая часть работает с плавками массой до 80 т.

При этом практически отсутствуют RH- или RH-O-вакууматоры с механическими насосами. В настоящее время в этих вакууматорах натекание составляет от 50 до 100 кг/ч. Необходимая производительность механического насоса, передающего объемный поток при работе RH-O-вакууматора, т. е. при использовании кислородной фурмы под вакуумом, повышается за счет использования защитного газа — аргона или азота.

Требования к конструкции вакуумных насосов

Основные узлы и дополнительное оборудование вакууматоров, требуемые в зависимости от применяемой технологии и соответствующей насосной системы, приведены в табл. 4.

Пыль, искроуловитель и охлаждение газа. В ходе вакуумирования из-за испарения летучих веществ (например, цинка, свинца, кадмия, марганца, железа и др.) из расплава, а также химической реакции в футеровке ковша образуется мельчайшая пыль с большой удельной поверхностью. Химический состав пыли существенно варьируется в за-

Таблица 2.
Коэффициенты пересчета для отдельных газов

	Молярная масса, г/моль	Коэффициент пересчета
Аргон/Продувочный газ	40	0,87
Воздух/Защитный газ для камеры наблюдения, натекание, объемы агрегата	29	1
Водород/Технологический газ	2	5
Азот/Технологический газ, защитный газ для фурмы циркуляционного вакууматора, камеры наблюдения и фурмы	28	1
Монооксид углерода/Технологический газ	28	1
Диоксид углерода/Технологический газ	44	0,87

Таблица 3.
Скорость откачки пароежекторных вакуумных насосов при давлении 0,67 мбар

Масса плавки, т	Камерный тип, кг _{эф. возд} /ч		Циркуляционный тип, кг _{эф. возд} /ч	
	VD-вакуумирование (Н, N)	VOD-вакуумное рафинирование. Обезуглероживание	RH-вакуумирование (Н)	RH-O-обезуглероживание
10	100	100		
50	200	200		
80	250	300	250	450
150	400	500	425	625
200	500		525	750
300	700		750	1000
350			850	1200
Целевые значения	Н — после вакуумирования — 1,5 ppm ($\times 10^{-4}$ %). N — после вакуумирования — 45 ppm ($\times 10^{-4}$ %)	Коррозионностойкая сталь ферритная < 18 % Cr. С — перед восстановлением < 0,01 %	Н — после вакуумирования — 1,5 ppm ($\times 10^{-4}$ %)	Особонизкоуглеродистые стали. С — перед раскислением — 15 ppm ($\times 10^{-4}$ %)

висимости от процесса вакуумирования, химического состава шлака, добавляемых легирующих и футеровки ковша.

Как правило, в RH- и VD-вакууматорах, оснащенных пароежекторными насосами, из-за низкого пылеобразования, пылеотделения при прямой конденсации в смешивающих конденсаторах и особенности пароежекторных насосов, заключающейся в транспортировке твердых частиц, никаких дополнительных мер по пылеулавливанию не предпринимается. В рамках профилактического обслуживания система пароежекторных насосов должна регулярно очищаться, особенно эжектор глубокого вакуума.

Для VOD-вакууматоров с пароежекторными насосами из-за высокого пылевыделения при продувке кислородом с целью увеличения продолжительности работы насоса между чистками рекомендуется использование рукавных фильтров. Так как при разрежении в камере образуется меньше пыли, то в режиме глубокого вакуума рукавный фильтр можно отключать.

В связи с небольшими зазорами в машинах с вращающимся ротором для всех вакууматоров,

оснащенных механическими насосами, необходимо предусмотреть рукавный фильтр, который нельзя отключить даже в режиме глубокого вакуума. Улавливаемая мелкодисперсная и, частично, пиро-



Рис. 5. Скорости откачки механических вакуумных насосов VD/VOD-вакууматоров, введенных в эксплуатацию в 2002–2012 гг.

Таблица 4.

Узлы и вспомогательное оборудование вакууматоров, используемые в зависимости от технологического процесса и типа вакуумного насоса

Процесс вакуумирования		VD		VOD		RH-O	
Насосная система		Паро-эжекторная	Механическая	Паро-эжекторная	Механическая	Паро-эжекторная	Механическая
Вакуум-провод	Без охлаждения	•					
	Огнеупорный	(•)				•	
	Водоохлаждаемый		•	•	•	(•)	•
Искрогаситель/циклон		•	(•)	•		•	
Рукавный фильтр		•	(•)	•		•	
Охладитель газов	Стандартный					•	
	Трубный теплообменник			(•)	•		•
Камера наблюдения	Зонд(ы) в рабочем пространстве	•		•		•	
	Смотровое стекло	•	•		•		•
Собственные источники воспламенения		•		•		•	
Фильтры		•	(•)	•		•	
Парогенератор*)		•		•		•	
Обработка сточных вод		•		•		•	

*) Котел-утилизатор, кондиционирование пара, паровой котел с подогревом.

• Необходимо.

(•) Рекомендуется (для вакуум-провода в зависимости от технологии).

форная пыль должна направляться на сбор и утилизацию с помощью соответствующего тракта (пневматический качающийся конвейер, пылесборник, лопастный дозатор, цепной транспортер и др.).

Горячие частицы шлака, металла или сублимированных материалов могут вызвать перфорацию рукавных фильтров. Это можно предотвратить, установив циклон, действующий подобно искроуловителю.

Максимальная рабочая температура обычных фильтровальных материалов (нетканый полиэфирный материал, арамидный материал, политетрафторэтилен) составляет около 140–240 °С, а температура на входе в механический насос должна быть ниже 60 °С (с целью обеспечения достаточного отвода тепла, выделяющегося при сжатии отходящего газа), поэтому возникает необходимость установки охладителя газа перед рукавным фильтром.

При VD-вакуумировании водные эквиваленты газовых потоков сравнительно невелики, поэтому технологический газ охлаждается за счет теплопередачи через вакуум-провод к окружающей среде до такой температуры, при которой охладитель обычно не требуется.

На стадии продувки кислородом VOD-вакууматоры отличаются повышенными по срав-

нению с VD-вакууматорами температурами технологического газа, поэтому в них, как минимум, часть вакуум-провода имеет водяное охлаждение, а перед рукавным фильтром установлен охладитель. В этом случае охладитель представляет собой трубчатый теплообменник и оснащен встроенным циклоном, улучшающим процесс грубой очистки и защищающим от летящих искр.

Охладитель газа в RH-вакууматоре устанавливается за горячим отсасывающим трубопроводом, и при наличии парожетторных насосов может представлять собой несложную и сравнительно недорогую конструкцию в виде емкости с приваренными снаружи полутрубными чашеобразными змеевиками. В вакууматорах с механическими насосами из-за высоких температур технологического газа необходимо ставить за горячим отсасывающим трубопроводом охладитель более сложной конструкции (например, с трубчатыми теплообменниками), при этом одновременно следует поддерживать достаточно небольшой перепад давления с целью установления низкого давления в вакуум-камере при дегазации под глубоким вакуумом.

Паровой котел и обработка сточных вод. В парожетторных насосных системах в качестве рабочего применяется слегка перегретый пар под давлением от 6 до 12 бар. В кислородно-конвертерных

цах, и даже в ряде электросталеплавильных цехов, такой пар часто получается при утилизации тепла отходящих газов или за счет кондиционирования низконапорного пара. Однако если такой возможности нет, то необходимый рабочий пар вырабатывается в котле при сжигании топлива (например, природного газа). Во всех случаях обратная охлаждающая вода конденсатора направляется на очистку и обратное охлаждение системы очистки сточных вод, при этом конденсированный рабочий пар может компенсировать потери при испарении в градирне, а также при необходимом удалении шламов в отстойнике.

Контроль за ходом процесса (камера наблюдения). Для наблюдения за расплавом при обработке в VD- или VOD-вакууматоре используется смотровое стекло на крышке камеры или зонды (камеры наблюдения), находящиеся в рабочем пространстве. Для безопасной и бесперебойной эксплуатации VD-вакууматора при проектировании рекомендуется оснастить его одним или двумя зондами рабочего пространства, без дополнительного смотрового стекла, при этом выбрать их положение таким образом, чтобы можно было видеть пятно продувки (действие донных продувочных блоков), а также часть стенки ковша (для контроля величины свободного борта).

Для защиты зондов от пыли и брызг в VD-вакууматорах используется сжатый воздух (10 м^3 (при н. у.)/ч на зонд), а в RH-вакууматорах — азот или аргон ($10\text{--}15 \text{ м}^3$ (при н. у.)/ч на зонд).

Если брать плотность воздуха при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $0,67 \text{ бар}$, то количество газа, необходимое для защиты двух зондов, дает рабочий объемный расход, соответствующий производительности одного стандартного модуля (блока) механических насосов для вакуумирования.

В вакууматорах с пароежекторными насосами подача защитных газов для зондов оказывает незначительное влияние на мощность насоса и на затраты по нему, а дополнительный блок на малотоннажных вакууматорах с механическими насосами является существенной статьей расходов.

Поэтому из-за проблем в эксплуатации на агрегатах с механическими вакуумными насосами, кроме внешних камер с роторными расходомерами (особенно на малотажных VD-вакууматорах), для наблюдения используются местные смотровые стекла. Следует учесть, что регулирование подачи продувочного газа и контроль давления в камере должны осуществляться при одновременном наблюдении за состоянием ванны металла. Кроме того, смотровое стекло должно легко монтироваться и извлекаться с целью быстрой его очистки или замены.

Натекание. Натекание воздуха от 20 до 25 кг/ч с учетом плотности воздуха при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении

$0,67 \text{ мбар}$, которое ведет к повышению рабочего объемного расхода, соответствующего производительности одного стандартного блока механических насосов, требует особого внимания при проектировании вакууматоров с механическими насосами. Любое отверстие, которое необходимо уплотнять (например, люки, вакуумный бункер, шлюз для подачи легирующих, фланцевые соединения в охладителе газов и рукавном фильтре, уплотнение камеры, гнезда для смотровых стекол, фурмы и др.), является дополнительным источником натекания, поэтому за счет соответствующих конструктивных решений и технического обслуживания количество мест натекания и их объем необходимо свести к минимуму.

Это является необходимым и для пароежекторных насосных систем, однако маловероятно, что чуть большее натекание окажет существенное влияние на мощность и затраты на пароежекторный насос. При этом каждый дополнительный блок в механических насосных системах (особенно в малотоннажных вакууматорах) является важной статьей расходов.

Соответствие нормам взрывобезопасности.

Можно предположить, что в отходящем газе может содержаться до 80% (объем.) монооксида углерода CO или до $25\text{--}30 \%$ водорода. Натекание, имеющее место в низкотемпературной части (охладитель газа, рукавный фильтр, вакуумный насос), где речь о дожигании CO не идет, приводит к тому, что в отходящий газ может попасть и кислород. В пределах атмосферной ступени вакуумного насоса давление и температура отходящего газа изменяются таким образом, что через определенное время может образоваться взрывоопасная смесь.

В механических (водокольцевых, роторно-щелевых, винтовых) вакуумных насосах имеются свои источники воспламенения, поэтому они попадают под действие требований к взрывобезопасности.

Производственные и капитальные затраты

Ниже представлен анализ трех примеров производственных и капитальных затрат.

Пример 1. Эксплуатация VD-вакууматора, используемого только для удаления водорода и десульфурации металла.

Пример 2. Эксплуатация RH-вакууматора, используемого только для удаления водорода.

Пример 3. Эксплуатация RH-O-вакууматора, используемого только для обезуглероживания металла с применением кислородной фурмы.

Для проведения указанных выше операций была разработана стандартная технологическая

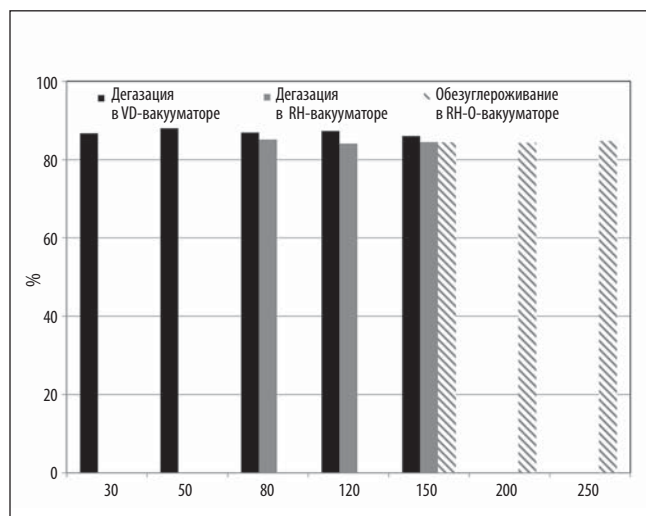


Рис. 6. Сокращение эксплуатационных затрат при использовании механических вакуумных насосов

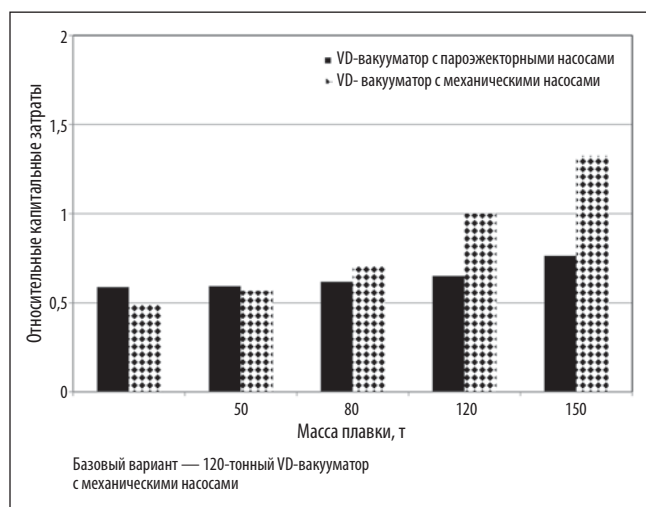


Рис. 7. Относительные капитальные затраты для VD-вакууматоров с механическими и парожетторными насосами

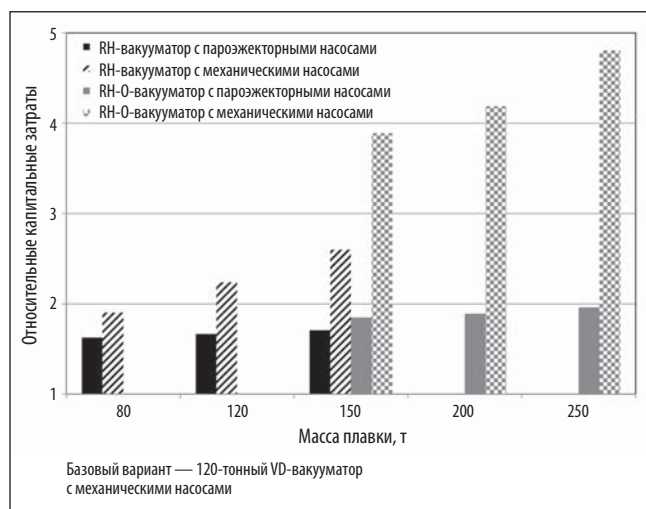


Рис. 8. Относительные капитальные затраты для RH- и RH-O-вакууматоров с механическими и парожетторными насосами

процедура, а затем определены производственные затраты при использовании парожетторного и механического насоса. В производственных затратах учитывали показатели расхода охлаждающей и свежей воды, природного газа для выработки пара и электроэнергии. Во всех примерах пар вырабатывался в котле с подогревом. Затраты на пылеулавливание, ремонт и техобслуживание в расчете не учитывали.

Механические насосы дают меньшие, по сравнению с парожетторными, производственные затраты.

Во всех трех примерах при использовании механических насосов производственные затраты снижались более чем на 80 % (рис. 6).

В плане инвестиционных затрат для парожетторных насосов учитывали затраты на такие важнейшие узлы, как вакуумные насосы, конденсаторы и охладитель газов (при необходимости), паровой котел, трубная обвязка и арматура, очистка охлаждающей воды для конденсаторов и рециркуляционные насосы и системы управления.

Для механических насосов учитывали вакуумные насосы, пылеулавливающее оборудование, охладитель газов (при необходимости), электрооборудование и приборы.

В обоих случаях не учитывали затраты на металлоконструкции, укрытия и возможные фундаментные работы. Таким образом, график не отражает затраты на все необходимые субподрядные работы.

Относительные капитальные затраты для приведенных выше примеров технологических процессов и компоновок вакууматоров показаны на рис. 7 и 8. При этом за основу взяты капитальные затраты на 120-тонный VD-вакууматор с механическими насосами, применяемый для дегазации металла.

Относительные капитальные затраты на сооружение VD-вакууматоров с механическими и парожетторными насосами, которые используются только для дегазации металла, в зависимости от массы плавки, показаны на рис. 7. Для плавки с массой меньше 100 т различие в капитальных затратах при использовании механических или парожетторных насосов незначительно. Производственные затраты при использовании механических насосов ниже на 80 %, поэтому естественно, что для создания вакуума рекомендуется использовать именно их. Это служит объяснением широкому распространению VD-вакууматоров с механическими насосами для плавки массой до 100 т, начиная с 2002 г. Для плавки массой более 100 т разница в затратах между механическими и парожетторными насосами не в пользу механических насосов. Это означает необходимость под-

робного анализа капитальных и эксплуатационных затрат.

Относительные капитальные затраты для RH- или RH-O-вакууматоров, используемых для обезуглероживания металла с помощью продувки кислородом под вакуумом, показаны на рис. 8. RH-вакууматоры в основном используются для дегазации плавки массой до 180 т, а RH-O-вакууматоры с продувкой кислородом под вакуумом обрабатывают плавки массой от 130 т. Капитальные затраты для плавки массой от 120 т не в пользу механических насосов.

Капитальные затраты на оснащение RH-O-вакууматоров для обезуглероживания металла механическими насосами достаточно высоки по сравнению с затратами при парожеторных насосах. Во время вакуумирования кислородная фурма располагается в рабочем пространстве (камере) агрегата. Она защищается газом, подаваемым в объеме 160 м³ (при н. у.)/ч. Кроме того, здесь нужно достаточно быстро снижать давление. В связи с этим вакуумные насосы должны обладать высокой производительностью. Однако недавно на предприятии в Чунцине (Китай) был введен в эксплуатацию 230-тонный RH-O-вакууматор с механическими вакуумными насосами [3]. Обычно в состав оборудования VD-вакууматоров входит до 10 насосных модулей (блоков), а 230-тонный RH-O-вакууматор был оснащен 19 модулями. Производительность модуля составляет 40 тыс. м³/ч при давлении на входе в насос 0,67 мбар.

Выводы

Благодаря своей универсальности вакуумирование занимает особое место среди процессов внепечной обработки стали, особенно при производстве высокоценных марок. К важнейшим процессам вакуумирования относятся процессы циркуляционного и камерного вакуумирования. Для создания необходимого среднего вакуума используются системы с парожеторными или механическими вакуумными насосами. В данной статье представлены основные технологические и конструктивные проблемы вакуумных насосов.

В частности, механические насосы отличаются от парожеторных существенно меньшими

эксплуатационными затратами (не нужен пар, потребность в водяном охлаждении существенно ниже), отсутствием необходимости очистки сточных вод и низкими капитальными затратами при сооружении VD-вакууматоров с массой плавки менее 80 т.

Однако механические насосы более чувствительны к натеканию в системе, т. е. нужно регулярно проводить проверку герметичности или профилактическое техническое обслуживание. С другой стороны, уже на стадии проектирования вакууматора следует исключить возможные источники погрешностей при измерении натекания.

Парожеторные насосы отличаются от механических существенно меньшими капитальными затратами для насосов большой производительности; более простым конструктивным решением без движущихся частей; отсутствием дополнительных расходов на улавливание пыли под вакуумом (рукавный фильтр) и дополнительных затрат на охлаждение газа.

В настоящее время опробованным инструментом контроля за ходом технологического процесса в вакууматоре являются зонды, расположенные в рабочем пространстве. Поэтому при расчете производительности насоса следует учитывать объемы защитного газа для зондов. Не рекомендуется использовать зонды в малотоннажных вакууматорах с механическими насосами.

Каждый тип насосов обладает своими преимуществами, поэтому во вновь проектируемых вакууматорах можно задействовать и тот и другой тип. При этом с целью проведения технико-экономической оценки с учетом индивидуальных особенностей сталеплавильного цеха необходимо располагать точной информацией о конкретных технологических проблемах, относящихся к процессам внепечной обработки, которые призван решить вакууматор. Для этого необходимо иметь полное представление о соответствующей проблеме в плане физико-химических и технологических особенностей. ЧМ

Библиографический список

См. на следующей стр. (в англ. блоке).

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

VACUUM PUMP SYSTEMS FOR SECONDARY METALLURGICAL PROCESSES

Dorstewitz F.¹, Dr. Eng., Head of Processing Equipment
 Tembergen D.¹, Mag. Eng., Head of Metallurgy

¹ SMS Mevac GmbH (Essen, Germany)

E-mail: dieter.tembergen@sms-mevac.com

Abstract: The following article describes the general technical requirements placed on vacuum pumps for secondary metallurgical plants. Vacuum treatment of liquid steel takes a prominent position among the various secondary metallurgical processes due to its versatile nature, especially in the production of high-quality steel grades. For generation of the required medium vacuum, efficient state-of-the-art secondary metallurgical plants use pump systems consisting of steam ejector pumps or mechanical vacuum pumps for the vacuum treatment of steel. To decide on which of these systems to use, it is necessary to also consider optimization of the overall system including any auxiliary equipment, in addition to the metallurgical task and the specific operating costs of the operating company. Distribution of vacuum facilities of VD and RH type worldwide in accordance with heat size during 1990–2010 is shown. Operation of the single-vessel RH plant at ArcelorMittal Eisenhüttenstadt, twin-tank VD facility Shanghai No. 1 are observed in this paper. Typical pressure reduction in a VD facility for degassing and typical pressure reduction for a steel grade to be decar-

burized in RH facilities are compared. Gas quantities arising for selected standard metallurgical operation (VD, VOD, RH, RH-O) and intake capacities of the steam injection vacuum pump and mechanical vacuum pumps at a pressure of 0.67 mbar are analyzed, including conversion factors for individual gases. Required plant components and auxiliary equipment as a function of the metallurgical process and of the vacuum pump system are presented. Operating and investing costs for using mechanical and steam-ejection vacuum pumps are estimated.

Key words: vacuum pumps, mechanical pumps, steam-ejection pumps, vacuum processing, chamber and circulation vacuum units, technical performance, stainless steel.

References:

1. Bruce, S.; Cleetham, V.; Legge, G.: stahl u. eisen 130 (2010) Nr. 11, S. 52/58.
2. Bruce, S.; Cleetham, V.; Legge, G.: Reducing energy demand and environmental emissions in secondary steel processing by using modular dry mechanical vacuum pumping systems, Proc. AISTech 2011, Indiana, USA, 2.–5. Mai 2011, S. 1377/87.
3. Bruce, S.; Cleetham, V.; Legge, G.; Villa, A.: Experience with dry vacuum pumping systems as applied to the VOD, VD-OB and RH processes for the production of stainless steel and ULC steels, Proc. 7th European Stainless Steel Conference, Como, Italien, 21.–23. Sept. 2011.

УДК 662.74 (063)

КОКСОХИМИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО В ПРОЦЕССЕ ИСТОРИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

М. ФАРРЕНКОПФ*

На фоне двух юбилейных событий — 100 лет со дня основания Коксохимического комитета Института стали Общества немецких металлургов и 25 лет со дня образования Общества немецких специалистов в области коксования — состоялся 32-й симпозиум по технологии коксования. 29 и 30 ноября 2012 г. в Бохуме почти 250 специалистов представили доклады об историческом и современном развитии технологии коксохимического производства. Кроме того, в Немецком горнорудном музее была организована постоянно действующая выставка на эту тему.

Ключевые слова: коксохимическое производство, технология, инновационные технологии, производство стали, экономическое и техническое развитие, конференция, юбилей.

30 ноября 2012 г. Комитет по коксованию Института стали Общества немецких металлургов отметил самый значимый юбилей: ровно 100 лет назад в Дортмунде Общество немецких металлургов

совместно с Обществом горнорудных интересов в горном округе Дортмунд учредили так называемую Комиссию по коксованию — предшественника современного Комитета по коксованию. По этому поводу 29 и 30 ноября 2012 г. почти 250 специалистов собрались на юбилейное заседание в Немецком горнорудном музее в Бохуме, организованном Комитетом по коксованию Института стали Общества немецких металлургов совместно с Обществом немецких специалистов в области

* М. Фарренкопф, докт. философ. наук, Общее руководство Горно-историческим информационным центром, Немецкий горнорудный музей в Бохуме; michael.farrenkopf@bergbaumuseum.de