

Обработка стали в ковше с использованием технологии циркуляционного вакуумирования

Технологический процесс циркуляционного вакуумирования (RH) жидкой стали, применяемый в промышленности на протяжении почти 50 лет, постоянно совершенствуется, для того чтобы удовлетворить всевозрастающие требования металлургов.

Обеспечивая высокую чистоту выплавляемой стали, возможность получения заданного химического состава и контроля температуры, этот процесс стал ключевым в современном сталеплавильном производстве.

Дальнейшие исследования, проводимые с целью осуществления экономически целесообразного обезуглероживания и удаления водорода до еще более низкого уровня при одновременном сокращении продолжительности обработки, расширяют перспективы применения процесса RH в будущем.

Введение

На протяжении последних 30 лет достигнуты огромные успехи в развитии процессов вторичной обработки стали. На первом этапе простые процессы обработки стали в ковше развивались в следующих направлениях:

- улучшение контроля раскисления;
- удаление включений путем легкого перемешивания ванны;
- десульфурация стали посредством синтетических шлаков и инъекционной технологии;
- модифицирования включений, прежде всего с помощью кальция.

На следующем этапе развития был внедрен процесс печь-ковш с целью повышения производительности и качества стали. Внедрение установок печь-ковш позволило:

- подогревать сталь и контролировать ее температуру;
- осуществлять буферный нагрев для последовательной разливки;
- вносить большие количества легирующих добавок;
- гомогенизировать химический состав и температуру;
- получать особо чистые стали благодаря расширению масштабов легкого перемешивания газом;
- проводить десульфурацию, а в некоторых случаях и дефосфорацию

стали посредством синтетического шлака.

На последнем этапе развития было внедрено вакуумное оборудование для вторичной «очистки» стали. Зависимость хода реакций от давления послужила причиной обработки жидкой стали под вакуумом (табл. 1). Вначале, более 40 лет назад, применили вакуумную дегазацию для удаления водорода. В настоящее время процесс вакуумной дегазации играет все более важную роль в современном сталеплавильном производстве, прежде всего из-за возрастающих требований к холоднокатаной листовой стали с повышенными механическими свойствами. Доминирующим агрегатом для вакуумной дегазации является установка RH [1], получившая свое название по названиям фирм Ruhrstahl и Heraeus.

Количество стали, требующей вакуумной обработки, будет непрерывно возрастать, и для сохранения конкурентоспособности каждый металлургический комбинат, имеющий международные связи, и многие электросталеплавильные цехи должны будут использовать процесс вакуумной дегазации.

Процесс RH/RH TOP

Схема вакуумной обработки жидкой стали с использованием установ-

Дитер Темберген, главный металлург, докт. Райнер Теворт, ст. менеджер по технологии, фирма **SMS Mevac GmbH**, Эссен, Германия; докт. Роберт Робей, технология металлургических процессов, фирма **SMS Mevac UK Limited**, Винсфорд, Чешир, Великобритания

Контакт: www.sms-mevac.com
E-mail: mail@sms-mevac.com

	Циркуляционное вакуумирование		Вакуумирование		
	RH-OB RH-TOP	RH	VOD VD-OB	Металлическая ванна	Ковш
Содержание углерода, $\times 10^{-4}$, %	<20	<20	<50	30–40	30–40
Скорость обезуглероживания	Очень высокая	Достаточная для сталей LC	Высокая	На 2–30 % ниже, чем в процессах RH-TOP/VOD	
Продолжительность обезуглероживания, мин	<13	<15	*)	15–20	20
Удаление водорода	Все системы осуществляют успешно				
Чистота стали	Все системы повышают чистоту стали Системы VD-OB, VOD, ванны и ковши требуют периода легкого перемешивания				
Десульфурация	Изредка **)	Нет	Высокая эффективность		
Химический нагрев	Есть	Нет	Есть	Нет	Нет
Относительные капитальные затраты	1	0,8–0,9	0,4–0,5	0,4–0,5	0,3–0,4
Производственные расходы	Имеют тенденцию к снижению				

*) В зависимости от исходного содержания углерода. **) Путем вдвух порошка через сопло.

Таблица 1. Сравнение различных систем вакуумирования стали

ки циркуляционного вакуумирования показана на **рис. 1**. Установка состоит из футерованной огнеупорами вакуум-камеры и двух прикрепленных к днщу этой камеры погружных патрубков (вводной и выводной). Оба патрубка футерованы изнутри огнеупорным кирпичом, а нижние участки имеют и наружную футеровку. Вводной патрубков в нижней части оборудован инжекционными газовыми трубками, равномерно распределенными по его периметру.

Процесс вакуумирования начинается после погружения обоих патрубков в расплав на достаточную глубину. Перед погружением через инжекционные трубки вводного патрубка начинают вдувать инертный газ, обычно аргон. По достижении требуемой глубины погружения расплав откачивают из камеры с помощью вакуумного насоса, связанного с вакуум-камерой посредством отводящего трубопровода. Плотность жидкой стали принимают равной $6,94 \text{ т/м}^3$ при температуре $1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Атмосферное давление, действующее на поверхность расплава в ковше, вынуждает сталь подниматься по погружным патрубкам на барометрическую высоту, равную примерно $1,45 \text{ м}$, под глубоким вакуумом.

Благодаря экономическим преимуществам, характеризующим применение установок для вторичной металлургической обработки стали, процессы вакуумной обработки постоянно совершенствуются. Развитие геометрии вакуум-камер (формы и размеров), поперечного сечения погружных патрубков и производительности установок RH показано на **рис. 2** [1]. На нем представлены конструкции установок RH, сооруженных в сталеплавильных цехах фирмы ThyssenKrupp Steel, начиная с первых лет внедрения этой технологии.

Характеристики процесса RH

С момента внедрения процесса RH в производство его основная цель заключалась в уменьшении содержания водорода в жидкой стали. Первые результаты оказались не такими успешными, как ожидали, из-за недостаточной глубины вакуума в реакторе. Через некоторое время, в начале 1960-х годов, применение паровых

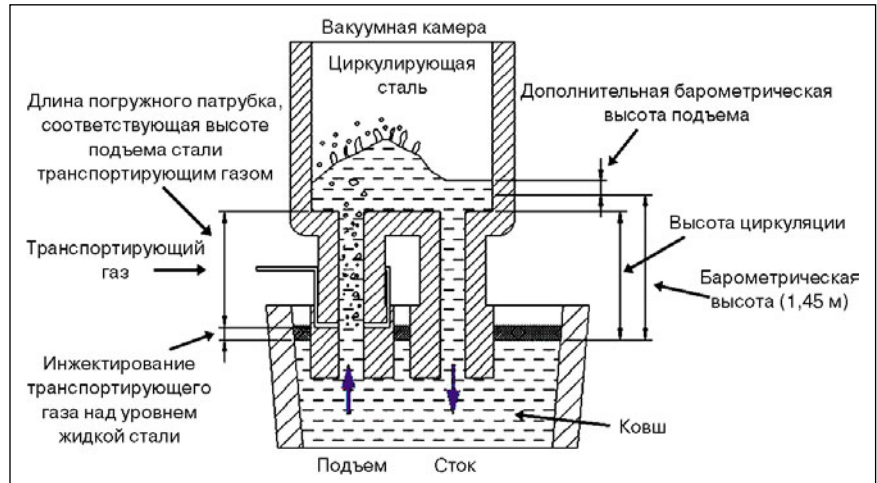
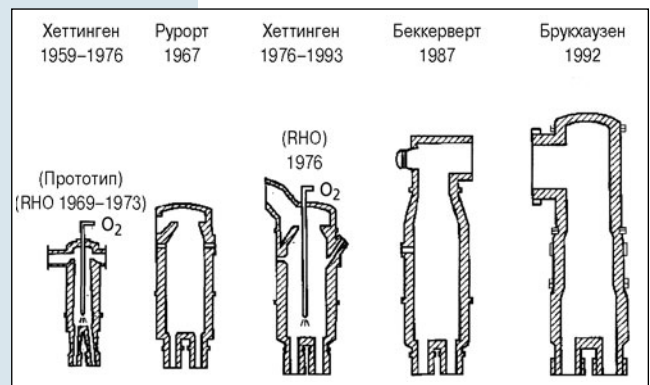


Рис. 1. Схема реакционной зоны процесса RH

Рис. 2. Различные конструкции установок RH (1958–1992 гг.)



эжекционных вакуумных насосов позволило получить низкий вакуум и уменьшить содержание водорода в жидкой стали до уровня $< 0,0001 \%$.

В конце 1970-х годов процесс RH начали применять и для обезуглероживания. В настоящее время с его помощью может быть достигнуто весьма низкое содержание углерода (менее $0,002 \%$), требуемое для производства автомобильного листа. Внесение легирующих добавок в ходе процесса RH позволяет получать высоколегированную сталь, точно соответствующую заданному химическому составу благодаря отсутствию воздуха и предотвращению реакций между металлом и шлаком.

Дальнейшим развитием процесса стало использование газообразного кислорода в процессе циркуляционного вакуумирования (варианты процесса RHO, RH-OB, RH-KTB, RH-MESID и MFB). Цель разработки этих вариантов — ускорение реакций обезуглероживания, разогрев жидкой стали путем алюминотермической реак-

ции, расплавление настывшей, поддержание высокой температуры в камере за счет реакции окисления CO до CO_2 на стадии обезуглероживания, а также подогрев футерованных вакуум-камер между циклами обработки. В настоящее время все эти варианты процесса, за исключением RH-OB, имеют общее название RH-TOP. В последние годы форсунки RH-TOP в некоторых случаях использовали также для вдувания порошка в жидкую сталь с целью уменьшения содержания серы или углерода до еще более низкого уровня.

Кинетика процесса RH

Процесс RH в общем случае не позволяет достигать равновесия, и количество удаляемого водорода, углерода и азота зависит от кинетических параметров процесса.

Обезуглероживание. Механизм процесса обезуглероживания в камере RH довольно сложен. Кинетика реакций зависит как от скорости рециркуляции, так и от скорости обезуглеро-



Рис. 3. Модель обработки стали в двух емкостях с ванной для перемешивания

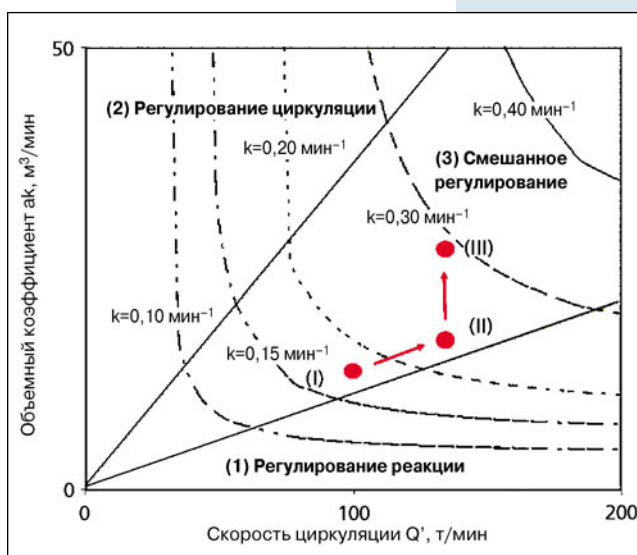


Рис. 4. Константа кажущейся скорости для процесса обезуглероживания в установке РН в зависимости от скорости циркуляции Q' и объемного коэффициента ak

живания. Влияние перемешивания ванны расплава на процесс обезуглероживания к настоящему времени хорошо изучено. Были выполнены многочисленные исследования, направленные на повышение эффективности этой реакции. Применяя простую модель, можно допустить, что расплавленная сталь в установке для вакуумной обработки может быть разделена между двумя емкостями (рис. 3), а именно: между вакуум-камерой, где происходит процесс обезуглероживания, и ванной для перемешивания. Между этими двумя емкостями расплавленная сталь циркулирует с постоянной скоростью. Баланс масс углерода в ванне для перемешивания и в камере РН можно представить с помощью следующих уравнений [2]:

$$V \cdot \frac{dC_1}{dt} = Q' \cdot (C_2 - C_1),$$

$$(1) \quad (C_1 - C_e) = (C_1^0 - C_e) \cdot \exp(-k \cdot t), \quad (2)$$

$$v \cdot \frac{dC_2}{dt} = Q' \cdot (C_1 - C_2) - ak \cdot (C_2 - C_e),$$

где V и v — объемы ванн для перемешивания и вакуумирования соответственно; ak — объемный коэффициент обезуглероживания; C — содержание углерода в жидкой стали в ванне для перемешивания (C_1), в камере РН (C_2), в равновесном состоянии (C_e); Q' — скорость циркуляции жидкой стали; t — время.

Если решить уравнения (1) и (2) с учетом допущения, что $C_1 = C_2 = C_t^0$ при $t = 0$ и объеме вакуум-камеры (v), значительно меньшем объема ванны для перемешивания (V), то можно получить следующие приближенные уравнения:

$$k = \frac{Q'}{V_M} \cdot \frac{ak}{Q' + ak} = \beta \cdot \rho_M \cdot \frac{A}{W_M}, \quad (4)$$

где b — коэффициент массопередачи углерода в жидкой стали; k — константа кажущейся скорости; A — площадь поверхности металла, подвергаемого вакуумной обработке.

Влияние скорости циркуляции Q' и объемного коэффициента обезуглероживания на константу кажущейся скорости рассчитано и показано на рис. 4. На представленной диаграмме можно выделить три области изменения константы k :

- k слегка возрастает при увеличении скорости циркуляции жидкой стали Q' — (регулирование реакции);
- k слегка возрастает при увеличении объемного коэффициента обезуглероживания ak (регулирование циркуляции);
- k находится под равным влиянием скорости циркуляции Q' и объемного коэффициента ak (смешанное регулирование).

Диаграмма на рис. 4 позволяет исследовать возможности изменения параметров процесса с целью увеличения k , т. е. сокращения времени обезуглероживания. Если скорость рециркуляции мала, то константа кажущейся скорости k регулируется изменением параметров циркуляции стали и может быть увеличена путем повышения скорости циркуляции. Этого можно достигнуть, увеличивая диаметр погружного патрубка или, в некоторых случаях, увеличивая расход транспортирующего газа. В этом случае объемный коэффициент обезуглероживания достаточно высок. Другими словами, перемешивание в ванне оказывает большое влияние во время начального и среднего периодов процесса обезуглероживания, когда этот процесс ускоренно развивается по мере понижения давления и углубления вакуума.

На диаграмме области (I), (II) и (III) соответствуют трем стадиям процесса обезуглероживания, исследованного на 270-тонной промышленной установке РН. Цель исследования — повышение скорости обезуглероживания. В начале исследования условия соответствовали стадии (I). По мере увеличения диаметра погружно-

го патрубка с целью повышения скорости циркуляции, условия процесса улучшались при переходе в стадию (II). Наконец, с увеличением коэффициента ak при более интенсивном перемешивании расплавленной стали в ванне и интенсификации взаимодействия газа и жидкого металла происходило дальнейшее улучшение условий процесса и его переход в стадию (III). Для современных установок РН еще одним лимитирующим фактором, играющим все более важную роль, являются сильные выплески жидкой стали в вакуум-камере. Это явление наблюдается при сильном повышении скорости обезуглероживания, которой соответствует высокое значение константы k .

Типичный пример изменения содержания углерода по ходу обработки приведен на рис. 5. Реакцию обезуглероживания проанализировали при допущении, что она является реакцией первого порядка согласно уравнению (3) при $C_e = 0$. Из этого следует, что реакцию обезуглероживания можно подразделить на три стадии с тремя различными значениями показателя k . Из уравнения следует, что кажущаяся скорость обезуглероживания может быть определена по наклону прямолинейного участка диаграммы, характеризующему изменение $-\ln([C_1]/[C_2])$ во времени. На первой стадии, когда создается вакуум в камере и начинается рециркуляция жидкой стали, величина k является минимальной по сравнению с остальными стадиями. На второй стадии величина резко возрастает. На этой стадии удаляется примерно 80–90 % всего углерода, удаляемого в процессе РН. Таким образом, она является основной в процессе обезуглероживания. При переходе в третью стадию содержание углерода приближается к критической величине, которая различна для каждой установки РН. Критическое содержание углерода между второй и третьей стадиями составляет примерно $20\text{--}50 \times 10^{-4} \%$. Ранее многие исследователи указывали, что на скорость обезуглероживания на второй стадии можно повлиять путем изменения скорости циркуляции и режима работы вакуумного насоса.

Дегазация. Процесс удаления водорода и азота на установках вакуу-

Рис. 5. Изменение содержания углерода и показателя $-\ln([C_1]/[C_2])$ по мере развития процесса обезуглероживания в установке РН

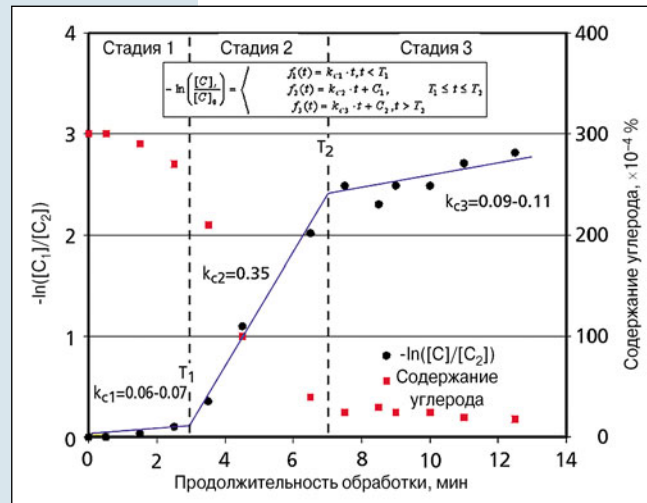
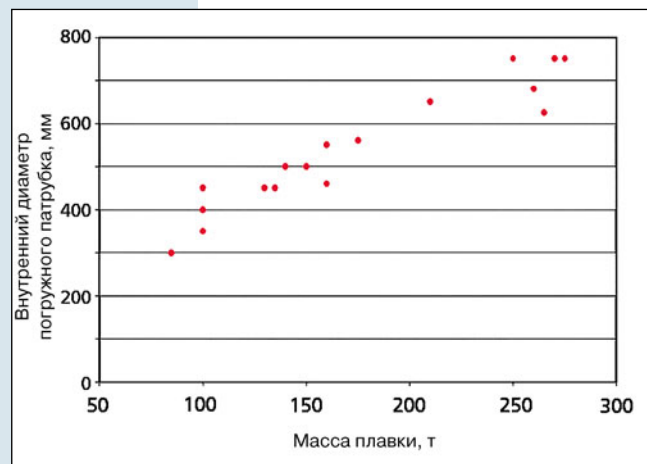


Рис. 6. Зависимость между диаметром погружного патрубка и массой плавки



мирования РН-ТОР можно представить уравнениями, аналогичными приведенным выше. В общем случае константа скорости для водорода больше, чем для углерода, так как коэффициент массопередачи для водорода примерно втрое больше, чем для углерода. Однако при низком содержании водорода показатель H_c становится важным и должен быть принят во внимание.

Удаление азота регулируется массопередачей в жидкой стали и химической кинетикой. Химические аспекты этого процесса зависят от содержания кислорода и серы, поскольку сегрегация последних на поверхности пузырьков транспортирующего газа препятствует удалению азота. В общем случае скорость удаления азота повышается по мере уменьшения содержания кислорода и серы. Скорость удаления азота ниже скорости удаления водорода. При низком содержании кислорода и серы эту скорость можно регулировать массопередачей в

жидкой стали, которая также происходит медленно. Константа скорости для азота примерно втрое меньше, чем для водорода.

Транспортирующий газ, размеры погружного патрубка и рециркуляция стали

Поскольку процесс РН основан на перемещении стали между ковшом и вакуум-камерой, то скорость циркуляции определяется скоростью протекания металлургических реакций и длительностью процесса, обусловленной необходимостью решения поставленных задач. Интенсивность циркуляции расплава зависит от диаметров камеры и погружных патрубков вакууматора, а также от расположения и числа форсунок для подачи транспортирующего газа.

Первые простейшие функциональные зависимости между скоростью циркуляции, внутренним

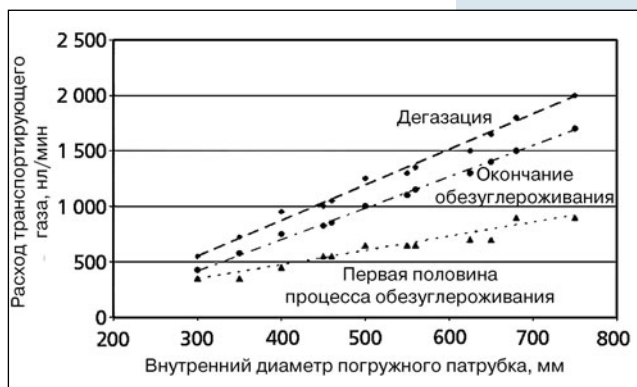


Рис. 7. Зависимость расхода транспортирующего газа от диаметра погружного патрубка

диаметром погружного патрубка и интенсивностью подачи аргона были опубликованы в 1963–1965 гг. В 1971 г. Хапфер и др. попытались описать влияние геометрических размеров погружного патрубка на скорость циркуляции стали [3]. Кроме вышеупомянутых зависимостей, Кувабара [4], Лутц [5] и Клемент [6] предложили расчетные формулы, в которых учитывалось влияние рабочего давления (вакуума) на циркуляцию стали.

Эмпирически выведенная формула (5) для определения скорости циркуляции стали, предложенная Оно и др. [7], учитывает так называемую зону факела (H), т. е. расстояние между плоскостью инжектирования транспортирующего газа и дном камеры с огнеупорной футеровкой:

$$U = 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot D_u^{0,3} \cdot D_d^{1,1} \cdot G^{0,31} \cdot H^{0,5}, \quad (5)$$

где U — скорость циркуляции стали; D_u — диаметр вводного патрубка; D_d — диаметр транспортирующего выводного патрубка; G — расход транспортирующего газа; H — часть длины погружного патрубка, используемая транспортирующим газом (высота «зоны факела»).

Параметр H неоднократно оценивали при практическом использовании формулы Оно. При увеличении параметра H скорость подъема во вводном патрубке будет возрастать. Уравнение (5) свидетельствует о сильном влиянии внутреннего диаметра погружного патрубка на ход процесса.

Описанные выше исследования легли в основу проектирования и разработки новых установок RH фирмой SMS Mevac. Рекомендации относительно оптимального соотношения между емкостью ковша и расходом транспортирующего газа показаны на рис. 6 и 7.

Выводы

Процесс RH, находящийся в промышленной эксплуатации почти 50 лет, непрерывно совершенствуется для удовлетворения все более ужесточающихся требований сталеплавительщиков. Дальнейшее совершенствование процесса идет по пути обеспечения экономически целесообразного способа обезуглероживания и удаления водорода до еще более низкого уровня при одновременном сокращении продолжительности обработки. На этом пути процесс RH может стать «прорывом в будущее». Обеспечивая возможность получения «чистой» стали с точно заданным химическим составом и контролем температуры, процесс RH в настоящее время широко применяется в современном сталеплавильном производстве. ■

Библиографический список

- [1] Hahn, F.-J.: RH Metallurgy and Practice; SMS Mevac RH Training Manual.
- [2] Fruehan, R. J.: Vacuum Degassing; Iron & Steel Society 1990.
- [3] Hupfer et al: Stromungsmechanische und reaktionskinetische Vorga..nge bei der Vakuumbehandlung von flu..ssigem Stahl, Forschungsarbeit der Technischen Hochschule Clausthal, 1971.
- [4] Kuwabara, T. et al: Trans. ISIJ Int., 28 (1988), pp. 305/314.
- [5] Lutz, W.: Stahl und Eisen, 115 (1995), No.8, pp. 89/93.
- [6] Kleimt, B. et al: Stahl und Eisen, 115 (1995), No.8, pp. 75/81.
- [7] Оно, К. et al: Denki Seiko 56 (1981), No.7, pp. 149/157.