

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **046149**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.02.12**

(51) Int. Cl. **C21B 5/06** (2006.01)  
**C21B 13/00** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**202390779**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.09.09**

---

(54) **СПОСОБ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

---

(31) **LU102057**

(56) **WO-A1-2009100819**  
**WO-A1-2005098052**

(32) **2020.09.09**

(33) **LU**

(43) **2023.06.15**

(86) **PCT/EP2021/074749**

(87) **WO 2022/053537 2022.03.17**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ПАУЛЬ БЮРТ С.А. (LU)**

(72) Изобретатель:  
**Кастаньола Кристиано, Микелетти  
Лоренцо (IT), Кинцель Клаус Петер  
(LU), Валериус Мириам (DE)**

(74) Представитель:  
**Веселицкий М.Б., Кузенкова Н.В.,  
Каксис Р.А., Белоусов Ю.В., Куликов  
А.В., Кузнецова Е.В., Соколов Р.А.,  
Кузнецова Т.В. (RU)**

---

(57) Предложен способ эксплуатации доменной печи для производства передельного чугуна, включающий в себя шаги: (А) нагревание первого потока пара в первом нагревателе перед или после смешивания с источником кислорода, выбранным из кислорода и обогащенного кислородом воздуха, для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара, (Б) нагревание первого потока доменного газа из доменной печи и первого потока природного газа во втором нагревателе перед или после их смешивания для обеспечения нагретого снабжающего углеродом потока, (В) подача первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и нагретого снабжающего углеродом потока либо в виде смешанного потока, либо раздельно в реактор каталитического частичного окисления для выработки потока горячего сингаза, и (Г) подача потока сингаза к шахте доменной печи.

---

**046149**  
**B1**

**046149**  
**B1**

### Область техники

В общем, настоящее изобретение относится к способу эксплуатации установки доменной печи, а также к такой установке доменной печи.

### Уровень техники

Несмотря на альтернативные способы, такие как плавление металлического лома или восстановление в электродуговой печи, доменная печь (BF) в настоящее время представляет собой наиболее широко используемый процесс производства стали. Одной из проблем установки доменной печи является доменный газ (BFG), выходящий из доменной печи. Поскольку этот газ выходит из доменной печи в верхней части, он обычно также называется верхним газом (top gas). В то время как вначале этому доменному газу позволяли просто выходить в атмосферу, это позднее предотвращалось посредством использования его в питаемых BFG электростанциях, чтобы не растрчивать энергосодержание газа и не вызывать чрезмерной нагрузки на окружающую среду. Одним компонентом доменного газа является  $\text{CO}_2$ , который является экологически вредным и главным образом бесполезным для промышленных применений. Действительно, отходящий газ, покидающий питаемую доменным газом электростанцию, типично имеет концентрацию  $\text{CO}_2$  от 20% по объему до 40% по объему. Доменный газ после сжигания обычно содержит кроме вышеупомянутого  $\text{CO}_2$  значительные количества  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2$ . Однако содержание  $\text{N}_2$  в значительной степени зависит от того, используется ли в доменной печи горячий воздух или (чистый) кислород.

Главным образом для уменьшения количества используемого кокса или другого источника углерода предлагалось возвращать доменный газ из доменной печи, обрабатывать его для улучшения его восстановительного потенциала и вводить его назад в доменную печь для содействия процессу восстановления. Одним способом выполнения этого является снижение содержания  $\text{CO}_2$  в доменном газе посредством адсорбции с перепадом давления (PSA) или вакуумной адсорбции с перепадом давления (VPSA), как это раскрыто в патентной заявке EP 2 886 666 A1. PSA/VPSA установки вырабатывают первый поток газа, который является богатым  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , и второй поток газа, богатый  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Первый поток газа может быть использован в качестве восстановительного газа и подается назад в доменную печь. Примером такого подхода является процесс ULCOS (производство стали с ультранизким  $\text{CO}_2$ ), где помимо рециркулированного первого потока газа в доменную печь подаются пылевидный уголь и холодный кислород. Этот тип печи также называется "печью с кислородным дутьем (OBF) с рециркуляцией верхнего газа".

Второй поток газа может быть удален из установки, и после извлечения оставшейся теплотворной способности утилизирован. Эта утилизация противоречиво заключается в закачивании богатого  $\text{CO}_2$  газа для хранения в подземные полости. Кроме того, хотя PSA/VPSA установки делают возможным значительное снижение содержания  $\text{CO}_2$  в доменном газе от примерно 35% до примерно 5%, они являются очень дорогостоящими в приобретении, поддержке и эксплуатации и, кроме того, они требуют много места.

Также было предложено использовать доменный газ в качестве агента реформинга для углеводородов для получения синтетического газа (также называемого сингазом), который может быть использован для нескольких промышленных целей. Согласно обычному процессу реформинга доменный газ смешивается с топливным газом, который содержит по меньшей мере один углеводород (например, низшие алканы). В так называемой реакции сухого реформинга углеводороды топливного газа реагируют с  $\text{CO}_2$  в доменном газе с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ . Одновременно углеводороды реагируют с  $\text{H}_2\text{O}$  в доменном газе также с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  в так называемой реакции парового реформинга. В любом случае полученный таким образом синтетический газ имеет значительно увеличенную концентрацию  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ .

Проблемами с вышеупомянутыми решениями является то, что они требуют дорогого и технически сложного выполнения.

### Техническая проблема

Таким образом, целью настоящего изобретения является разработка нового способа эксплуатации установки доменной печи, то есть доменной печи и ее вспомогательного выполнения, а также, по меньшей мере, частичное преодоление этих проблем.

### Общее описание изобретения

Для достижения этой цели настоящее изобретение предлагает, в первом аспекте, способ эксплуатации доменной печи для производства передельного чугуна, включающий в себя шаги:

(А) нагревание первого потока пара в первом нагревателе перед или после смешивания с источником кислорода, выбранным из кислорода ( $\text{O}_2$ ) и обогащенного кислородом воздуха, для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара,

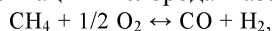
(Б) нагревание первого потока доменного газа из доменной печи и первого потока природного газа во втором нагревателе перед или после их смешивания для обеспечения нагретого снабжающего углеродом потока,

(В) подача первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и нагретого снабжающего углеродом потока либо в виде смешанного потока, либо раздельно в реактор каталитического частичного окисления для выработки потока горячего сингаза, и

(Г) подача потока сингаза к шахте доменной печи.

Во втором аспекте настоящее изобретения предлагает установка доменной печи для производства передельного чугуна, включающая в себя доменную печь, оснащенную газовыми входами в шахту, выполненными для подачи потока сингаза в доменную печь. Установка доменной печи также включает в себя первый нагреватель в гидродинамической связи ниже по потоку с потоком пара и в гидродинамической связи ниже по потоку или выше по потоку с источником кислорода, обеспечивающим кислород или обогащенный кислородом воздух, причем первый нагреватель выполнен для нагревания потока пара для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара, второй нагреватель находится в гидродинамической связи с верхней частью доменной печи, выполненной для направления первого потока доменного газа, и с источником первого потока природного газа, причем второй нагреватель выполнен для нагревания первого потока доменного газа и первого потока природного газа либо отдельно, либо в смеси для обеспечения нагретого снабжающего углеродом потока, причем первый и второй нагреватели находятся в гидродинамической связи ниже по потоку по меньшей мере с одним или более входами реактора каталитического частичного окисления, выполненного для производства потока сингаза, или непосредственно для подачи первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и нагретого снабжающего углеродом потока отдельно к одному или более входам реактора или через смешивающий блок, выполненный для первого объединения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара с нагретым снабжающим углеродом потоком, для обеспечения объединенного потока и для подачи объединенного потока к одному или более входам реактора. Кроме того, реактор каталитического частичного окисления также находится в гидродинамической связи ниже по потоку с газовыми входами в шахту доменной печи. Предпочтительно, установка доменной печи может эксплуатироваться посредством реализации способа согласно первому аспекту и как описано более подробно ниже.

Реакторы каталитического частичного окисления в технике производства синтетического газа (сингаза). Предпочтительно, реактор каталитического частичного окисления является реактором каталитического частичного окисления с коротким временем контакта. Процесс каталитического частичного окисления (CPO) основан на следующей реакции, где кислород может также происходить из воздуха или обогащенного кислородом воздуха или комбинации кислорода и азота:



проводимой посредством соударения в течение нескольких миллисекунд газообразных предварительно смешанных потоков реагентов с чрезвычайно горячей каталитической поверхностью. Возникающая быстрая и избирательная химическая реакция, которая ограничена внутри тонкой межфазной зоны "твердое тело-газ", окружающей частицы катализатора. Здесь молекулы типично проводят очень короткое время при изменяющихся между 600 и 1200°C температурах. Главной проблемой для технической эксплуатации является возможность предотвращения распространения реакций в газовую фазу, которая должна оставаться при "относительно низкой" температуре. Это условие способствует образованию первичных продуктов реакции (а именно, CO и H<sub>2</sub>), замедляя цепные реакции.

Экспериментальные исследования показывают, что эти продукты частичного окисления вырабатываются посредством параллельных и конкурирующих поверхностных реакций, и что образование продуктов частичного окисления является предпочтительным в условиях CPO вследствие очень высоких поверхностных температур. Наличие реакций в этих локальных окружающих условиях определяет в некоторых случаях значения превращения и избирательности более высокие, чем предсказанные посредством термодинамического равновесия при температурах на выходе реактора. Каталитическое частичное окисление и каталитическое частичное окисление с коротким временем контакта (SCT-CPO) объединяют характеристики гетерогенного катализа и беспламенного горения в пористой среде и известны, например, из WO2011072877, WO2011151082 и L.E. Basini and A. Guarinoni, "Short Contact Time Catalytic Partial Oxidation (SCT-CPO) for Synthesis Gas Processes and Olefins Production", Ind. Eng. Chem. Res. 2013, 52, 17023-17037 (Каталитическое частичное окисление с коротким временем контакта (SCT-CPO) для процессов получения синтетического газа и производства олефинов). Так как SCT-CPO известно, главные преимущества каталитического частичного окисления в приложении к производству синтеза для ввода в доменную печь могут быть подытожены следующим образом:

- малые размеры (размеры реактора уменьшены более чем на 2 порядка величин по сравнению с классическим реактором парового реформинга),

- техническая и эксплуатационная простота (значительно уменьшенная сложность по сравнению, например, с паровым реформингом),

- самые низкие капитальные затраты на кг произведенного сингаза/час среди всех технологий реформинга природного газа,

- возможность модульной конструкции предварительно изготовленных и монтируемых на стойке блоков,

- гибкость в отношении состава сырья и производительности, и
- снижение капиталовложений и потребления энергии.

В самом деле, изобретатели установили, что технология производства сингаза может быть предпочтительным образом применена к смеси природного газа и доменного газа, обеспечивая посредством этого сингаз с составами, которые особо пригодны для подачи в шахту доменной печи. Фактически пода-

ваемый в СРО реактор природный газ подвергается реакции частичного окисления, генерируя CO и H<sub>2</sub> и производя тепло. Последнее используется в системе для поддержания эндотермической реакции реформинга (конверсия углеводорода посредством пара или CO<sub>2</sub>), которая приводит к производству CO и H<sub>2</sub>. Однако доменный газ имеет пониженное содержание углерода по сравнению с природным газом. Таким образом, поведение в реакторе совсем другое. Повышение процентного содержания доменного газа в потоке подаваемого газа возможно, но должны поддерживаться значения, такие как критические отношения, например отношение пара к углероду или отношение кислорода к углероду и максимально приемлемая концентрация компонента в сингазе. По этой причине может быть предпочтительным ограничить долю доменного газа, смешиваемого с потоком природного газа. Максимальная доля доменного газа в подаваемой смеси газов с природным газом обычно находится в пределах от 15 до 30% в зависимости от фактического состава и температуры подаваемого в реактор доменного газа.

В самом деле, изобретатели установили, что особо предпочтительное качество может быть получено посредством регулирования отношения кислород/углерод до значений от 0,58 до 0,68 мол./мол., предпочтительно от 0,60 до 0,66 мол./мол., более предпочтительно от 0,62 до 0,64 мол./мол., наиболее предпочтительно примерно 0,63 мол./мол., в то время как отношение пар/углерод, предпочтительно, регулируется до значения от 0,10 до 0,40 мол./мол., предпочтительно от 0,15 до 0,35 мол./мол., более предпочтительно от 0,20 до 0,30 мол./мол., наиболее предпочтительно примерно 0,25 мол./мол.

Поведение доменного газа в реакторе каталитического частичного окисления строго связано с реакциями, участвующими в реакторе каталитического частичного окисления. Помимо компонентов, участвующих в частичном окислении, реакция сдвига вода-газ также определяет конечный состав сингаза. Было установлено, что присутствие CO<sub>2</sub> в потоке доменного газа влечет за собой изменение равновесного состава, что приводит к избытку CO<sub>2</sub> для реакции с водородом, увеличивая, таким образом, содержание CO и H<sub>2</sub>O.

В дополнение к упомянутым выше выгодам одним из главных преимуществ настоящего способа и установки является существенно уменьшенное производство CO<sub>2</sub> при эксплуатации доменной печи за счет регенерации части доменного газа для повторного использования с целью уменьшения ввода углерода в доменную печь.

Кроме того, ввод в шахту получающегося сингаза позволяет значительное снижение количества кокса на тонну произведенного передельного чугуна, так называемого удельного расхода кокса. Дополнительно ввод сингаза частично из природного газа является не только совместимым с вводом через фурмы порошкообразного угля или природного газа, но может предпочтительным образом сделать возможной замену дополнительных количеств кокса на природный газ, то есть природный газ, превращенный в присутствии доменного газа в сингаз. Эти и другие преимущества настоящего способа эксплуатации доменной печи, а также раскрытого сейчас установки доменной печи, будут более подробно пояснены ниже.

Доменный газ, который также может называться верхним газом или газом доменной мечи (BFG), собирается из верхней части доменной печи и является газом, содержащим главным образом CO<sub>2</sub> и другие компоненты, такие как CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> или другие. Он может также содержать некоторое количество N<sub>2</sub> в зависимости от подачи горячего дутья. Для обычно эксплуатируемых доменных печей концентрация N<sub>2</sub> в доменном газе обычно составляет от 35 до 50% по объему (% по объему), в то время как для газа доменной печи, эксплуатируемой согласно настоящему изобретению, то есть с использованием произведенного как описано здесь сингаза, концентрация N<sub>2</sub> обычно ниже, например ниже 20% по объему, ниже 10% по объему или даже ниже 5% по объему. Обычно доменный газ нуждается в очистке для уменьшения, например, содержания в нем пыли. Следовательно, первый поток доменного газа далее подвергают шагу очистки газа, предпочтительно шагу удаления пыли, шагу удаления металлов и/или шагу удаления HCl, обычно перед смешением с первым потоком природного газа. Соответственно, в предпочтительной установке доменной печи гидродинамическая связь, направляющая первый поток доменного газа из доменной печи, включает в себя установку очистки газа. Эта установка очистки газа включает в себя блок удаления пыли, такой как один или более циклонов, скрубберы и/или мешочные фильтры, блок удаления металлов, такой как реактор с неподвижным слоем активированного угля и/или блок удаления HCl, такой как скрубберы с вводом реагента. Если требуется довести доменный газ для требуемого давления для генерирования сингаза, пригодного для ввода в шахту доменной печи, он может быть сжат, например, до 0,3-0,5 МПа посредством специальной системы, обеспеченную ниже по потоку относительно газовой сети доменной печи.

Питающие потоки к реактору каталитического частичного окисления, например снабжающий углеродом поток и поток обогащенного кислородом пара, обычно должен достичь температуры от 300 до 450°C после объединения для должной работы реактора. Поэтому в предпочтительных вариантах осуществления способа нагретый снабжающий углеродом поток из шага (Б) в дальнейшем нагревают перед шагом (В) в третьем нагревателе. В предпочтительных вариантах осуществления установки доменной печи второй нагреватель, таким образом, находится в гидродинамической связи ниже по потоку с третьим нагревателем, выполненным для дальнейшего нагревания снабжающего углеродом потока выше по потоку относительно смешивающего блока.

Тепло для нагревателей может быть выработано с помощью соответствующих средств и источников энергии. Предпочтительно, в настоящем способе второй поток доменного газа сжигают в горелке в присутствии топочного воздуха или обогащенного кислородом воздуха в первом нагревателе и/или втором нагревателе и/или третьем нагревателе для обеспечения тепла в нагревателях. В особо предпочтительных вариантах осуществления первый, второй и третий нагреватели выполнены как соответствующие теплообменники, и одну горелку используют для нагревания первого второго и третьего теплообменников.

В предпочтительных вариантах осуществления отработанный газ из горелки(-ок) может подаваться к первому потоку доменного газа из доменной печи, к первому потоку природного газа или к уже (частично) нагретому снабжающему углеродом потоку. Посредством этого не только может быть использовано остаточное тепло отработанного газа из горелки, но также произведенный в горелке  $\text{CO}_2$  добавлен к уже содержащемуся в доменном газе.

В других предпочтительных вариантах осуществления первый, второй и третий нагреватели выполнены в виде теплообменников, использующих технологическое тепло из других процессов в установке доменной печи или заводе.

В зависимости от источника (или состава) может быть предпочтительным или необходимым подвергать первый поток доменного газа и/или первым поток природного газа и/или поток нагретого снабжающего углеродом потока последующей обработке, такой как шаг десульфуризации. Поэтому установка доменной печи может дополнительно включать в себя блок десульфуризации, находящийся в гидродинамической связи с первым потоком доменного газа и/или первым потоком природного газа и/или нагретым снабжающим углеродом потоком, предпочтительно в гидродинамической связи с нагретым снабжающим углеродом потоком.

Согласно изобретению первый поток пара нагревают в первом нагревателе перед или после обогащения кислородом для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара. Предпочтительно, кислород/обогащенный кислородом воздух для обогащения первого нагретого потока пара нагревают до температуры в пределах (то есть, отличающейся на более чем)  $100^\circ\text{C}$ , предпочтительно в пределах  $50^\circ\text{C}$ , от температуры первого нагретого потока пара перед обогащением.

В особо предпочтительных вариантах осуществления изобретения первый нагретый поток обогащенного кислородом пара, поток природного газа и поток доменного газа подают в таких количествах, что поток сингаза шага (Г) имеет химический состав, выполняющий следующие ограничения:

$\text{CH}_4 < 5\%$  по объему,

$\text{H}_2\text{O} < 8\%$  по объему, и

молярное отношение  $(\text{CO} + \text{H}_2) / (\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2) > 7$ .

Предпочтительно, поток сингаза шага (Г) имеет температуры между  $800$  и  $1100^\circ\text{C}$ , более предпочтительно между  $900^\circ\text{C}$  и  $1000^\circ\text{C}$ .

Было установлено, что для эксплуатации доменной печи может быть желательным или выгодным добавлять водород, прежде всего, так называемый возобновляемый или "зеленый" водород в подходящем месте технологического потока. В этом контексте возобновляемый или "зеленый" водород является водородом ( $\text{H}_2$ ), вырабатываемым посредством электролиза воды с использованием электроэнергии, поступающей из возобновляемых источников, таких как ветер, солнечная энергия и гидроэнергия. Прежде всего, может быть предпочтительным добавлять водород к потоку сингаза после реактора каталитического частичного окисления перед шагом (Г) для приспособления его температуры до требуемого температурного уровня сингаза для ввода в шахту или если водород предварительно нагрет до такого же температурного уровня.

Предварительный нагрев водорода обычно реализуют, например, в подходящем другом нагревателе или теплообменнике, который, предпочтительно, нагревается в той же оболочке, что и первый, второй и третий нагреватели, более предпочтительно нагреваемой посредством одной общей горелки.

Выражение "природный газ" в контексте настоящего изобретения обозначает не только природный газ как таковой, то есть встречающуюся в природе газовую смесь ископаемого происхождения, состоящую главным образом из метана и обычно включающую в себя переменные количества других высших алканов, но также газов с подобными углеводородными компонентами, такими как биогаз или коксовый газ, где содержание загрязнений (если необходимо, после очистки) делает их совместимыми с контактом с катализом в СРО реакторе.

"Приблизительно" в настоящем контексте означает, что данное цифровое значение перекрывает диапазон значений от  $-10\%$  до  $+10\%$  цифрового значения, предпочтительно, в диапазон от  $-5\%$  до  $+5\%$  цифрового значения.

"Питание шахты", "питание шахты доменной печи" или "ввод газа в шахту" подразумевают ввод материала выше уровня горячего дутья (фурмы), то есть выше заплечиков доменной печи, предпочтительно, в зоне восстановления газ-твердое тело железной руды выше когезионной зоны.

Выражение "обогащенный кислородом воздух" обозначает воздух, к которому был добавлен газообразный кислород ( $\text{O}_2$ ), так что доля кислорода в газе составляет от 23 до 85% по объему или выше, предпочтительно от 60 до 75% по объему. Выражение "обогащенный кислородом пар" обозначает пар

(газообразную воду), включающий в себя кислород, обычно от 10 до 85% по объему или выше, предпочтительно от 25 до 75% по объему, газообразного кислорода ( $O_2$ ).

Выражение "в гидродинамической связи" означает, что два устройства соединены каналами или трубами так, что текучая среда, например газ, может течь от одного устройства к другому. Эти выражение включает в себя средства для изменения этого течения, например клапаны или вентиляторы для регулирования массового расхода, компрессоры для регулирования давления и т.д., а также управляющие элементы, такие как датчики, исполнительные механизмы и т.д., необходимые или желательные для соответствующего управления работой доменной печи в целом или работой каждого из элементов в установке доменной печи.

### Краткое описание чертежей

Предпочтительные варианты изобретения будут теперь описаны в качестве примера со ссылкой на соответствующие чертежи, на которых:

Фигура является схематической схемой технологического процесса осуществления установки доменной печи согласно изобретению и позволяющей реализацию способа согласно изобретению.

Другие подробности и преимущества настоящего изобретения будут понятны из следующего подробного описания нескольких не ограничивающих вариантов осуществления со ссылкой на приложенный чертеж.

### Описание предпочтительных вариантов осуществления

Требования к сингазу и его использованию в доменной печи отличаются от уже используемых в настоящее время применений.

Степень превращения и температурный уровень сингаза:

В других отраслях промышленности сингаз обычно вырабатывается и затем охлаждается для отделения избытка пара из сингаза. В связи с этим в процессах ниже по потоку используется только охлажденный газ. В существующих промышленных процессах, кроме сталелитейной промышленности, высокий восстановительный потенциал не является важным. Однако в сталелитейной промышленности является предпочтительным высокий восстановительный потенциал, предпочтительно, выше 7, причем восстановительный потенциал определяется следующим молярным отношением:  $(cCO+cH_2)/(cH_2O+cCO_2)$ .

Кроме того, высокие температуры сингаза являются положительно совместимыми с температурным уровнем, требуемым для ввода в шахту, чтобы позволять высокую термическую эффективность. Итак, температура должна быть порядка от 900 до 1100°C, чтобы позволять его ввод в шахту доменной печи.

Отношение  $H_2/CO$ .

В других отраслях промышленности, кроме сталелитейной промышленности, сингаз используется для специфических применений, таких как производство чистого водорода, аммиака или производство других химических компонентов. В связи с этим обычно требуется специфическое отношение водорода к CO.

В сравнении с этим целью использования сингаза в доменной печи является восстановление руды, что достигается с помощью двух восстановительных компонентов, CO и водорода. Так как имеется разница между восстановлением руды с помощью CO или водорода, эта разница является относительно незначительной, принимая во внимание, что сингаз является только частью используемого в доменной печи восстановительного газа.

Выбросы  $CO_2$ .

Кокс является главным источником энергии при производстве чугуна в доменной печи. С экономической и связанной с  $CO_2$  точки зрения это менее благоприятный источник энергии. Широко используется замена кокса другими источниками энергии, в большинстве случаев вводимыми на уровне фурм. В силу соображений стоимости главным образом вводится порошкообразный уголь, однако в странах с низкой ценой на природный газ используется этот источник энергии. Часто в доменную печь вводятся остатки наподобие пластмассовых отходов.

Эти вспомогательные топлива могут оказывать положительное влияние на выбросы  $CO_2$  из доменной печи при производстве стали, между тем их использование ограничивается по технологическим причинам и очень часто эти ограничения в настоящее время уже достигнуты. Доменная печь вырабатывает доменный газ (BFG), который содержит приблизительно до 40% подводимой к доменной печи энергии. Этот газ обычно используется для покрытия внутренних потребностей в тепле сталеплавильного завода, а также для выработки электроэнергии. С целью уменьшения  $CO_2$  следа основанного на доменной печи производства стали важной стратегией является, таким образом, использование такого BFG для металлургических целей и применение других энергий с малыми выбросами  $CO_2$ , таких как зеленая электрическая энергия для покрытия остающихся потребностей в энергии сталелитейного завода.

Поэтому производство синтетического газа, помимо использования образующего малые количества  $CO_2$  углеводорода, должно также включать в себя насколько возможно доменный газ для улучшения потенциала снижения выбросов  $CO_2$  при производстве чугуна в доменной печи.

Загрязнения.

В силу использования угля и кокса, а также часто дешевых вторичных топлив, таких как пластмассовые отходы или смола для использования в доменной печи, типичные и вредные химические компоненты, такие как содержащие хлор и серу молекулы, являются частью доменного газа. При использова-

нии этого газа для производства сингаза эти компоненты могут приводить к быстрому отравлению катализатора реформинга, если он не подвергается должным образом обработке.

Давление.

Реакции реформинга благоприятствует низкое давление согласно принципу Ле Шателье. Однако из-за высокой стоимости сжатия сингаза ниже по потоку от реактора реформинга (вследствие увеличенной скорости потока) и малых размеров выполнения и слоя катализатора обычные способы обработки сингаза выполняются при высоком давлении. В случае установки доменной печи требуются только низкие уровни давления. Поэтому сингаз вводят в шахту доменной печи с давлением обычно между 1 и 4 бар избыточного давления.

Реформинг и вспомогательные технологии для производства сингаза:

Реакции реформинга.

Реформинг природного газа может в принципе осуществляться посредством следующих реакций:

Частичное окисление в присутствии кислорода:  $\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 = \text{CO} + \text{H}_2$ .

Эта реакция является основной реакцией в СРО и является сильно экзотермической, выделяя посредством этого большие количества энергии.

Паровой реформинг в присутствии пара:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ .

Сухой реформинг в присутствии  $\text{CO}_2$ :  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ .

Эти две последние реакции являются сильно эндотермическими и требуют много тепла.

Технологии реформинга и их адаптации к вводу в шахту доменной печи Термодинамическое равновесие при требуемом наилучшем восстановительном потенциале газа приводит к температуре сингаза, которая еще слишком низкая для его подачи в шахту. Фактически повышение температуры дополнительно приводит к более высоким требованиям к кислороду и пониженному восстановительному потенциалу сингаза, что не является благоприятным для предназначенного использования.

Предварительный нагрев подаваемого газа.

Изобретатели установили, что для улучшения ситуации к СРО может быть применен предварительный нагрев вводимого газа. Фактически, с таким предварительным нагревом может быть не только увеличен восстановительный потенциал сингаза, но также может быть получена требуемая температура сингаза примерно  $1000^\circ\text{C}$ .

На чертеже показан пример осуществления предпочтительного способа эксплуатации установки доменной печи, включающего в себя ввод в шахту потока сингаза при температуре примерно  $1000^\circ\text{C}$  и давлении от 1 до 4 бар избыточных.

На чертеже показаны следующие главные потоки, которые будут дополнительно пояснены ниже:

[1] - Первый поток природного газа, подаваемый ко второму нагревателю после смешения с первым потоком доменного газа.

[2] - Первый поток доменного газа, который будет смешан с первым потоком природного газа и затем подан ко второму нагревателю и СРО реактору. Этот первый поток доменного газа должен быть перед этим должным образом очищен (удаление металлов и  $\text{HCl}$ ).

[2\*] - Второй поток доменного газа, подаваемый к горелке для нагревания первого, второго и третьего нагревателей.

[3] - Нагретый снабжающий углеродом поток, состоящий из нагретого доменного газа и природного газа для подачи к СРО реактору.

[4] - Нагретый поток пара (для обогащения кислородом) и подачи к СРО реактору.

[5] - Нагретый поток кислорода (для смешивания с паром) и подаваемый к СРО реактору.

[6] - Первый нагретый поток обогащенного кислородом пара для подачи к СРО реактору.

[7] - Первый нагретый поток обогащенного кислородом пара и нагретый снабжающий углеродом поток в виде объединенного потока в СРО реактор (текущий из статического смесителя к реактору).

[8] - Поток сингаза (для ввода в шахту доменной печи), факультативно с добавленным водородом, предпочтительно возобновляемым водородом.

На чертеже первый поток [2] доменного газа собирают из верхней части доменной печи и при необходимости очищают, например, посредством удаления пыли, металлов,  $\text{HCl}$  и т.п. Этот поток очищенного доменного газа и первый поток [1] природного газа нагревают во втором и третьем нагревателе перед или после смешивания для получения нагретого снабжающего углеродом потока [3] для расположенного ниже по потоку реактора каталитического частичного окисления. Если представляется необходимым или полезным, первый поток [1] природного газа, первый поток [2] доменного газа или снабжающий углеродом поток [3] могут быть дополнительно очищены, например, посредством подвергания их шагу десульфурации (фильтр десульфурации).

Одновременно первый поток [4] пара нагревают в первом нагревателе перед или после смешивания с источников кислорода, выбранным из кислорода (газообразный кислород  $\text{O}_2$ ) и обогащенного кислородом воздуха для получения первого нагретого потока [6] обогащенного кислородом потока. Предпочтительно, источник кислорода сначала нагревают в нагревателе кислорода, например теплообменнике, нагреваемым посредством второго потока пара для получения нагретого потока [5] кислорода, сконденсированной воды, получающейся из теплообмена этого второго потока пара, выгружаемой затем из тепло-

обменника (выгрузка продукта конденсации). Нагретый поток [5] кислорода, предпочтительно, нагревают в четвертом нагревателе (нагреватель кислорода) до температур, достигающих/близко соответствующих температуре нагретого снабжающего углеродом потока [4] (то есть, температур, отличающихся не более чем на 100°C, предпочтительно не более чем на 50°C, от температур нагретого снабжающего углеродом потока).

Первый, второй и третий нагреватели, предпочтительно, являются теплообменниками, предпочтительно в одной и той же оболочке (огневой подогреватель), более предпочтительно нагреваемой общей горелкой. Эта горелка, предпочтительно, приводимой в действие посредством сжигания второго потока доменного газа в присутствии воздуха, обогащенного кислородом воздуха или даже кислорода. В некоторых вариантах осуществления отходящий газ, получающийся от сжигания второго потока доменного газа в присутствии воздуха, обогащенного кислородом воздуха или кислорода, может быть добавлен к первому потоку [2] доменного газа или к первому потоку [1] природного газа или к снабжающему углеродом потоку [3], предпочтительно, к первому потоку [2] доменного газа выше по потоку от вышеупомянутых шагов очистки.

Если полезно или необходимо, поток азота из источника азота может быть добавлен к нагретому снабжающему углеродом потоку [4], к нагретому потоку [5] кислорода или к объединенному потоку [6], предпочтительно, после нагревания в другом (азотном) нагревателе до температур, достигающих/близко соответствующих температуре потока, к которому он добавляется (то есть, температур, отличающихся не более чем на 100°C, предпочтительно не более чем на 50°C, от температур потока, к которому он добавляется).

Затем первый нагретый поток [4] пара смешивают с нагретым потоком [5] источника кислорода для получения первого нагретого потока [6] обогащенного кислородом пара, который будет подан к СРО реактору через один или более входов СРО реактора.

Нагретый снабжающий углеродом поток также подают к СРО реактору через один или более входов реактора. Объединенный поток из первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и снабжающего углеродом потока [7] факультативно после смешивания в смесителе, например СРО статическом смесителе, затем вводят в реакцию на поверхности катализатора в СРО реакторе для образования потока сингаза [8], имеющего температуры в диапазоне от 900 до 1100°C.

Если желательно или выгодно, поток водорода, предпочтительно, возобновляемого или так называемого "зеленого" водорода, может быть добавлен к потоку [8] сингаза если необходимо после предварительного нагревания в подходящем нагревателе (нагреватель водорода).

(Факультативно, дополнительно сжатый) поток сингаза [8] с добавленным факультативно водородом, предпочтительно, возобновляемым водородом, после этого подают к входу газа в шахту доменной печи, то есть выше заплечиков, предпочтительно, в зону восстановления газ-твердое оксида железа над когезионной зоной.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ эксплуатации доменной печи для производства передельного чугуна, включающий в себя шаги:

(А) нагревание первого потока пара в первом нагревателе перед или после смешивания с источником кислорода, выбранным из кислорода и обогащенного кислородом воздуха, для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара,

(Б) нагревание первого потока доменного газа из доменной печи и первого потока природного газа во втором нагревателе перед или после их смешивания для обеспечения нагретого снабжающего углеродом потока,

(В) подача первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и нагретого снабжающего углеродом потока либо в виде смешанного потока, либо раздельно в реактор каталитического частичного окисления для выработки потока горячего сингаза, и

(Г) подача потока сингаза к шахте доменной печи.

2. Способ по п.1, причем источником кислорода является кислород, а реактор каталитического частичного окисления является реактором каталитического частичного окисления с коротким временем контакта.

3. Способ по п.1 или 2, причем первый поток доменного газа дополнительно подвергают шагу очистки газа, предпочтительно шагу удаления пыли, шагу удаления металла и/или шагу удаления HCl, перед смешиванием с первым потоком природного газа.

4. Способ по одному из пп.1-3, причем нагретый снабжающий углеродом поток шага (Б) перед шагом (В) дополнительно нагревают в третьем нагревателе.

5. Способ по одному из пп.1-4, причем второй поток доменного газа сжигают в горелке в первом и/или втором нагревателе и/или, если применимо, третьем нагревателе для обеспечения тепла в нагревателях.

6. Способ по п.5, причем первый, второй и третий нагреватели нагревают посредством одной и той



же горелки.

7. Способ по п.5 или 6, причем произведенный горелкой(-ами) отходящий газ подают к первому потоку выходящего из доменной печи доменного газа, который подают к первому потоку природного газа или к нагретому снабжающему углеродом потоку.

8. Способ по одному из пп.1-7, причем первый поток доменного газа и/или первый поток природного газа и/или нагретый снабжающий углеродом поток подвергают шагу десульфуризации, предпочтительно шагу десульфуризации подвергают нагретый снабжающий углеродом поток.

9. Способ по одному из пп.1-8, причем температура объединенного потока в шаге (В) составляет от 200 до 500°C, предпочтительно от 300 до 400°C.

10. Способ по одному из пп.1-9, причем источник кислорода для обогащения первого нагретого потока пара нагревают до температуры, отличающейся не более чем на 100°C, предпочтительно не более чем 50°C, от температуры первого нагретого потока пара перед обогащением кислородом.

11. Способ по одному из пп.1-10, причем первый нагретый поток обогащенного кислородом пара, поток природного газа и поток доменного газа подают в таких количествах, что поток сингаза в шаге (Г) имеет химический состав, удовлетворяющий следующим ограничениям:  $\text{CH}_4 < 5\%$  по объему,  $\text{H}_2\text{O} < 8\%$  по объему и  $(\text{CO} + \text{H}_2) / (\text{H}_2 + \text{CO}_2) > 7$ .

12. Способ по одному из пп.1-11, причем перед шагом (Г) к потоку сингаза добавляют поток  $\text{H}_2$ , предпочтительно поток возобновляемого  $\text{H}_2$ , причем поток  $\text{H}_2$ , предпочтительно, был нагрет.

13. Установка доменной печи для производства передельного чугуна, для осуществления способа по одному из пп.1-12, включающая в себя доменную печь, оснащенную газовыми входами в шахту, выполненными для подачи потока сингаза в доменную печь, причем установка доменной печи также включает в себя первый нагреватель в гидродинамической связи ниже по потоку с потоком пара и в гидродинамической связи ниже по потоку или выше по потоку с источником кислорода, обеспечивающим кислород или обогащенный кислородом воздух, причем первый нагреватель выполнен для нагревания потока пара для обеспечения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара, второй нагреватель находится в гидродинамической связи с верхней частью доменной печи, выполненной для направления первого потока доменного газа, и с источником первого потока природного газа, причем второй нагреватель выполнен для нагревания первого потока доменного газа и первого потока природного газа либо раздельно, либо в смеси для обеспечения нагретого снабжающего углеродом потока, причем первый и второй нагреватели находятся в гидродинамической связи ниже по потоку по меньшей мере с одним или более входами реактора каталитического частичного окисления, выполненного для производства потока сингаза, или непосредственно для подачи первого нагретого потока обогащенного кислородом пара и нагретого снабжающего углеродом потока раздельно к одному или более входам реактора или через смешивающий блок, выполненный для первого объединения первого нагретого потока обогащенного кислородом пара с нагретым снабжающим углеродом потоком, для обеспечения объединенного потока и для подачи объединенного потока к одному или более входам реактора, причем реактор каталитического частичного окисления находится в гидродинамической связи ниже по потоку с подводящими газ в шахту доменной печи газовыми входами.

14. Установка доменной печи по п.13, причем источник кислорода является газообразным кислородом, а реактор каталитического частичного окисления является реактором каталитического частичного окисления с коротким временем контакта.

15. Установка доменной печи по одному из пп.13-14, причем гидродинамическая связь, направляющая первый поток доменного газа из доменной печи, включает в себя установку очистки газа, предпочтительно включающую в себя блок удаления пыли, блок удаления металлов и/или блок удаления HCl.

16. Установка доменной печи по одному из пп.13-15, причем второй нагреватель находится в гидродинамической связи ниже по потоку с третьим нагревателем, выполненным для дополнительного нагревания снабжающего углеродом потока выше по потоку от смешивающего блока.

17. Установка доменной печи по одному из пп.13-16, причем горелка в первом и/или втором нагревателе и/или, если применимо, третьем нагревателе находится в гидродинамической связи с верхней частью доменной печи для направления и сжигания второго потока доменного газа для обеспечения тепла в нагревателях.

18. Установка доменной печи по п.17, причем первый, второй и третий нагреватели нагревают посредством одной и той же горелки.

19. Установка доменной печи по п.17 или 18, причем горелка или каждая горелка включают в себя устройство сбора отходящего газа, которое выполнено для подачи отходящего газа к первому потоку доменного газа из доменной печи, к первому потоку природного газа или к нагретому снабжающему углеродом потоку.

20. Установка доменной печи по одному из пп.13-19, также включающая в себя блок десульфуризации, расположенный в гидродинамической связи с первым потоком доменного газа и/или с первым потоком природного газа и/или нагретого снабжающего углеродом потока, предпочтительно в гидродинамической связи с нагретым снабжающим углеродом потоком.

21. Установка доменной печи по одному из пп.13-20, причем первый нагреватель, второй нагреватель и, если применимо, третий нагреватель выполнены с возможностью управления так, что температура объединенного потока составляет от 200 до 500°C, предпочтительно от 300 до 400°C.

22. Установка доменной печи по одному из пп.13-21, причем первый нагреватель находится в гидродинамической связи выше по потоку с источником кислорода, также включающим в себя четвертый нагреватель, выполненный для нагрева кислорода для обогащения первого нагретого потока пара ниже по потоку от первого нагревателя до температуры, отличающейся не более чем на 100°C, предпочтительно не более чем 50°C, от температуры первого нагретого потока пара перед обогащением кислородом.

23. Установка доменной печи по одному из пп.13-22, причем гидродинамическая связь между реактором каталитического частичного окисления и газовыми входами в шахту доменной печи обеспечена гидродинамической связью с источником потока  $H_2$ , предпочтительно потока возобновляемого  $H_2$ , более предпочтительно гидродинамическая связь с источником потока  $H_2$  обеспечена другим нагревателем для нагрева потока  $H_2$ .

