

DESCRIPCIÓN

Método para reducir la huella de carbono en la operación de una planta metalúrgica para la producción de arrabio.

Campo técnico

5 La presente invención se refiere en general a un método para reducir la huella de carbono en la operación de una planta metalúrgica para producir arrabio y una planta metalúrgica para producir arrabio con una huella de carbono reducida.

Técnica anterior

10 La necesidad y el deber de reducir las emisiones CO₂ está influyendo en la industria siderúrgica como uno de los principales actores responsables. La descarbonización mundial está empujando a las siderúrgicas hacia una transición hacia una producción más sostenible, basada en la maximización de las fuentes llamadas “verdes”, como la energía eléctrica “verde” y los combustibles y reductores renovables, en sustitución de los fósiles.

15 El hidrógeno parece ser el nuevo factor clave para la reducción del CO₂ en la actualidad y, en particular, para una futura producción de acero descarbonizado. Para cumplir el objetivo de descarbonización, el hidrógeno debe producirse sin emisiones de dióxido de carbono, lo que significa producción, por ejemplo, mediante un proceso de electrólisis alimentado con energía eléctrica procedente de fuentes renovables. De esta forma se produce un hidrógeno “verde”, completamente libre de emisiones de dióxido de carbono. Sin embargo, los costes de producción de hidrógeno verde son actualmente elevados y, aunque se prevé una disminución en los próximos años, esto puede comprometer la viabilidad de su aplicación en el sector siderúrgico, incluso en escenarios futuros, debido a la enorme demanda de energía y caudal en los procesos de producción de hierro y acero.

20 Problema técnico

25 Un objeto de la presente invención es proporcionar una nueva ruta para una producción de arrabio más sostenible a partir de finos de mineral de hierro, en particular un método para la producción de arrabio adecuado para ser instalado en plantas metalúrgicas, tales como en acerías integradas, cuyo método debería ofrecer la flexibilidad para operar en un rango que va desde emisiones limitadas hasta cero emisiones de dióxido de carbono, tal como para permitir garantizar una transición más gradual en la reducción de la huella de carbono u operar al menos con bajas emisiones de dióxido de carbono en caso de no disponibilidad temporal de determinados recursos renovables.

Descripción general de la invención

30 Para superar el problema mencionado anteriormente, la presente invención propone, en un primer aspecto, un método para reducir la huella de carbono en la operación de una planta metalúrgica para producir arrabio, el método comprende las etapas de:

a) precalentar finos de mineral de hierro en un primer precalentador eléctrico basado en el efecto Joule y/o calentar con microondas a una temperatura superior a 600 °C, preferiblemente de 700 a 900 °C, en particular de 750 °C a 850 °C, tal como aproximadamente 800 °C, para obtener finos de mineral de hierro precalentado;

35 b) reducir parcialmente los finos de mineral de hierro precalentados en uno o más reactores de lecho fluidizado en presencia de un gas reductor caliente para obtener hierro parcialmente reducido;

c) alimentar el hierro parcialmente reducido a un horno de arco sumergido que comprende un baño de metal fundido con una capa superior de escoria;

d) reducir y fundir adicionalmente el hierro parcialmente reducido dentro del horno de arco sumergido en presencia de un material carbonoso para obtener arrabio fundido;

40 en el que, en la etapa b), el gas reductor caliente comprende hidrógeno, gas de síntesis, es decir, gas sintético, gas residual del(los) reactor(es) de lecho fluidizado, gas residual del horno de arco sumergido, otros gases residuales (que contienen CO) de la planta metalúrgica, o mezclas de los mismos, en donde dicho gas de síntesis se produce a partir de gas natural o biometano, gas de alto horno, gases residuales del propio horno de arco sumergido u otro horno de arco sumergido, otros gases residuales de la planta metalúrgica, o mezclas de dos o más de ellos en uno o más reactores de reformado (catalíticos o no catalíticos) en presencia de aire o aire enriquecido con oxígeno, vapor o dióxido de carbono (dependiendo del proceso de reformado utilizado); en donde, en la etapa b), el gas reductor caliente tiene una temperatura superior a 550 °C; y en donde, en la etapa b), el hierro parcialmente reducido tiene un grado de metalización del 55 al 75 %, preferiblemente del 60 al 70 %.

50 En un segundo aspecto, la invención propone una planta metalúrgica para producir arrabio con una huella de carbono reducida, preferiblemente implementando el método para reducir la huella de carbono en la operación de una planta metalúrgica para producir arrabio de acuerdo con el primer aspecto, la planta metalúrgica comprende:

- un primer precalentador eléctrico configurado para precalentar finos de mineral de hierro basándose en el efecto Joule y/o calentamiento por microondas en finos de mineral de hierro precalentados a una temperatura superior a 600 °C, preferiblemente de 700 a 900 °C, en particular de 750 °C a 850 °C, tal como aproximadamente 800 °C;

5 - uno o más reactores de lecho fluidizado configurados para reducir parcialmente los finos de mineral de hierro precalentado en presencia de un gas reductor caliente a hierro parcialmente reducido hasta un grado de metalización del 55 al 75 %, preferiblemente del 60 al 70 %;

- un horno de arco sumergido que comprende un baño de metal fundido con una capa superior de escoria, configurado para recibir el hierro parcialmente reducido y reducir y fundir adicionalmente el hierro parcialmente reducido en presencia de un material carbonoso para obtener arrabio fundido;

10 en el que la planta metalúrgica comprende además uno o más reactores de reformado (catalíticos o no catalíticos) configurados para producir gas de síntesis a partir de una alimentación de gas natural o biometano, una alimentación de gas de alto horno, una o más alimentaciones de gases residuales del horno de arco sumergido y otros gases residuales de la planta metalúrgica, o una alimentación de mezclas de los mismos y una alimentación de aire o aire enriquecido con oxígeno, vapor o dióxido de carbono (según se requiera por el proceso de reformado elegido); en
15 donde la planta metalúrgica comprende además una alimentación de hidrógeno; un dispositivo de mezcla de gas reductor en caliente conectado de manera fluida aguas arriba de uno o más reactores de reformado (catalíticos o no catalíticos) y de la alimentación de hidrógeno, y opcionalmente a una o más de dichas alimentaciones de un gas residual del horno de arco sumergido y de otros gases residuales de la planta metalúrgica, o una alimentación de
20 mezclas de los mismos y aguas abajo a una entrada de uno o más reactores de lecho fluidizado, estando configurado dicho dispositivo mezclador de gas reductor caliente para proporcionar gas reductor caliente a una temperatura superior a 550 °C que comprende hidrógeno, gas de síntesis, gases residuales del reactor(es) de lecho fluidizado, gases residuales del horno de arco sumergido, otros gases residuales de la planta metalúrgica, o mezclas de dos o
25 más de los mismos. El dispositivo de mezcla de gas reductor caliente puede ser una unidad de mezcla dedicada o puede ser solo la confluencia de la alimentación de hidrógeno (precalentado), el gas de síntesis del reactor de reformado (catalítico o no catalítico), el gas residual de(del)(los) reactor(es), de lecho fluidizado los gases residuales de un/el de horno de arco sumergido y los demás gases residuales de la planta metalúrgica.

En el contexto de la invención, otros gases residuales de la planta metalúrgica pueden ser cualquier gas residual que contenga CO disponible y apropiado o mezclas de dos o más de los mismos. Pueden seleccionarse entre uno o más
30 gases residuales de una planta de horno de coque, una planta de DRI (hierro de reducción directa), un horno de oxígeno básico, un horno eléctrico (distinto del horno de arco sumergido utilizado en el presente método), etc.

Como tal, el núcleo del método y la planta metalúrgica propuestos se basa en una etapa de (pre)reducción parcial en uno o más reactores de lecho fluidizado hasta un grado de metalización del 55 al 75 %, preferiblemente del 60 al 70 %, basado únicamente en reductores gaseosos en caliente, seguido de una fundición eléctrica del tipo horno de arco sumergido (SAF), donde se produce la fundición y finalización de la reducción.

35 En consecuencia, la invención aprovecha una combinación de tres hallazgos: (1) que la curva cinética de la reducción de los finos del mineral de hierro es muy pronunciada, hasta del 70 al 75 %, lo que significa que se puede alcanzar el grado de metalización del 75 %, por ejemplo, en 20 a 30 minutos, mientras que una metalización adicional del 75 % al 95 % en las mismas condiciones tardaría más de dos horas; (2) que esta reducción parcial se puede obtener cuando se efectúa únicamente con gas reductor caliente como reductor, que además puede basarse al menos parcialmente
40 en los gases residuales disponibles en una planta metalúrgica, tales como los gases residuales del horno de arco sumergido del método en sí o de otros procesos, pero también otros gases residuales como se detalla más adelante, (3) que esta reducción parcial se puede obtener al menos parcialmente a base de gas natural, biometano o mezclas de los mismos y/o gas de alto horno, gas residual del horno de arco sumergido, otros gases residuales de la planta metalúrgica o mezclas de ellos, si se convierten en un reactor de reformado catalítico o no catalítico en un gas de
45 (síntesis) reductor eficiente para ser utilizado directamente como tal o en combinación con proporciones variables de hidrógeno y/u otros gases residuales disponibles ricos en CO; y (4) que el tratamiento adicional en un horno de arco sumergido en presencia de un material carbonoso sólido que actúa como reductor adicional permite transformar el mineral de hierro sólo parcialmente reducido en arrabio.

De acuerdo con la invención, el gas reductor caliente en la etapa b), comprende o consiste en hidrógeno, gas de
50 síntesis, gas residual del(los) reactor(es) de lecho fluidizado, gas residual del horno de arco sumergido, otros gases residuales (que contienen CO) gases de la planta metalúrgica, o mezclas de los mismos. Preferiblemente, dicho gas reductor caliente comprende o consiste en al menos gas de síntesis como se define en el presente contexto, es decir, un gas de síntesis producido a partir de gas natural o biometano, gas de alto horno, gases residuales del(los) reactor(es) de lecho fluidizado, gases residuales del horno de arco sumergido, otros gases residuales de la planta
55 metalúrgica, o mezclas de dos o más de ellos en uno o más reactores de reformado (catalíticos o no catalíticos) en presencia de aire o aire enriquecido con oxígeno, vapor o dióxido de carbono (dependiendo del proceso de reformado utilizado). De manera opcional y ventajosa, comprende hidrógeno (adicional), gases residuales del(los) reactor(es) de lecho fluidizado, gases residuales del horno de arco sumergido, otros gases residuales (que contienen CO) de la planta metalúrgica o mezclas de dos o más del mismo. En realizaciones, dicho gas reductor caliente comprende o consiste
60 en dicho gas de síntesis, hidrógeno (adicional) y al menos un gas seleccionado entre gases residuales del reactor(es)

de lecho fluidizado, gases residuales del horno de arco sumergido y otros gases residuales (que contienen CO) de la planta metalúrgica.

Un reactor de lecho fluidizado preferido para este fin es un reactor de lecho fluidizado de tipo circulante que proporciona una alta velocidad de deslizamiento entre gas y sólidos, dando como resultado altos coeficientes de transferencia de masa y calor. Por lo tanto, uno o más reactores de lecho fluidizado son preferiblemente del tipo circulante.

Un horno de arco sumergido (SAF) es un tipo especial de horno eléctrico (arco) adecuado para realizar procesos de reducción. En el horno de arco sumergido, las puntas de los electrodos están enterradas en la escoria, donde la potencia activa se convierte en energía térmica por efecto Joule y donde tienen lugar las reacciones. La carga, que consiste de mineral grueso y/o fino aglomerado y/o mineral prerreducido, fundentes y portadores de carbono, desciende de acuerdo con el rendimiento del horno y se calienta. Al entrar en la zona de reacción, los óxidos con el punto de fusión más bajo se licuan. A medida que aumenta la densidad de energía hacia los electrodos, todos los óxidos finalmente se funden. De este modo se produce una reducción carbotérmica mediante un material sólido que contiene carbono. Dependiendo del control de temperatura y del punto de fusión de la escoria, los óxidos metálicos se reducen, en el orden de la demanda de energía eléctrica necesaria para la reducción con carbono. La escoria forma una capa líquida, formada principalmente por ganga, a través de la cual descienden las gotas de metal reducidas para formar el baño de metal en el fondo del hogar. El baño está saturado de carbono, para garantizar la reducción carbotérmica de la escoria, y el producto final es, por lo tanto, arrabio caliente, por ejemplo, con un contenido de carbono del 3 al 4 %. En el contexto de esta invención, el término "horno de arco sumergido" o "SAF" incluye todos los diferentes tipos posibles de hornos de arco eléctrico optimizados para la aplicación específica, por ejemplo, hornos de corriente continua, hornos de corriente alterna, hornos de baño abierto, tipos circulares, tipos rectangulares, etc.

En consecuencia, el horno de arco sumergido puede considerarse una fundición eléctrica flexible, capaz de realizar la reducción de óxidos metálicos, cargados tanto como mineral de hierro como hierro prerreducido (o hierro de reducción directa, DRI). En términos generales, para aplicaciones de fabricación de hierro, es aconsejable tener una etapa de prerreducción entre el horno de arco sumergido, para limitar el consumo de energía eléctrica y mejorar la eficiencia general de la planta. Sin embargo, un horno de arco sumergido no requiere una metalización alta de DRI, a diferencia de lo que ocurre con los hornos de arco eléctrico (EAF) de última generación. Esto permitió a los inventores encontrar el punto operativo de compensación óptimo para la presente invención de 55 a 75 %, preferiblemente 60 a 70 % de metalización, siendo la última parte de la metalización realizada en un reactor separado, lo que se ha experimentado como la parte más crítica, debido a problemas de disponibilidad (principalmente por problemas de adherencia) y limitaciones que pueden comprometer la viabilidad, tal como menor productividad, mayor tiempo de residencia, menor eficiencia, etc.

Además, El método y la planta metalúrgica descritos en el presente documento están particularmente adaptados para hacer uso de recursos renovables como fuente de energía y agentes reductores sólidos y gaseosos, tales como hidrógeno "verde", biocarbón y electricidad "verde". Además, el método puede convertirse de forma flexible y gradual en una operación totalmente ecológica (cero emisiones de dióxido de carbono), dependiendo de la disponibilidad de recursos: El hidrógeno para el reactor de lecho fluidizado se puede producir mediante electrólisis utilizando (únicamente) electricidad renovable (H_2 "verde") o producido a partir de recursos fósiles con aplicación de tecnología de captura de CO_2 (H_2 "azul") o producido a partir de recursos fósiles (H_2 "gris"); se puede utilizar carbón fósil y/o biocarbón en el horno de arco sumergido; Otros gases residuales de plantas metalúrgicas, tales como gases de acerías integradas, pueden alimentarse al reactor de lecho fluidizado. El método también está particularmente dirigido a permitir una operación mixta con (proporciones variables de) hidrógeno, gases residuales metalúrgicos que contienen CO recirculado y gas de síntesis, con una mayor flexibilidad en la conversión a una operación "verde" dependiendo de la disponibilidad de fuentes y costes. En este sentido, el método propuesto puede operarse de manera flexible, desde evitar completamente las emisiones de dióxido de carbono hasta emisiones limitadas, dependiendo del tipo y cantidad de recursos energéticos utilizados: la misma planta metalúrgica puede alimentarse únicamente con fuentes de energía renovables, reduciendo el gas, el biometano y reductor sólidos (material carbonoso), con cero emisiones de CO_2 o todavía puede alimentarse parcialmente de recursos fósiles (por ejemplo, hidrógeno gris/azul, carbón, gas natural, electricidad a partir de combustibles fósiles, etc.) con una huella de CO_2 limitada, pero en cualquier caso menor que las tecnologías de fabricación de hierro utilizadas actualmente.

El biometano es una fuente de energía renovable derivada de biomasa agrícola (cultivos dedicados, subproductos y residuos agrícolas y animales), agroindustrial (residuos de la cadena de procesamiento de alimentos) y los Residuos Sólidos Municipales de Fracción Orgánica (OFMSW). El biometano se obtiene en dos fases: producción de biogás bruto principalmente mediante digestión anaeróbica de biomasa y posterior eliminación de componentes no compatibles (CO_2), proceso también conocido como "actualización". El biometano tiene una calidad similar al gas natural fósil, con una concentración de metano del 90 % o superior. Por lo tanto, el producto de la presente invención es un arrabio "verde" que se puede producir totalmente libre de CO_2 , si se utilizan únicamente fuentes renovables como insumo energético y reductores sólidos y gaseosos.

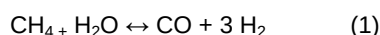
Como consecuencia, en realizaciones ventajosas, al menos parte, preferiblemente toda la energía eléctrica necesaria en el método o en la planta metalúrgica es electricidad renovable. En particular, al menos parte de la energía eléctrica necesaria en el(los) precalentador(es) y el horno de arco sumergido es electricidad renovable.

Alternativa o adicionalmente, el material carbonoso en la etapa d) comprende (o consiste en) biocarbón producido por biomasa, que incluye opcionalmente madera de demolición, como hasta un 40 % en peso, y/o plásticos de desecho, como hasta un 20 % en peso. El material carbonoso se puede alimentar al horno de arco sumergido como tal y formar por separado el hierro parcialmente reducido. Sin embargo, puede resultar beneficioso alimentar el material carbonoso al menos parcialmente al horno de arco sumergido en combinación o mezcla con el hierro parcialmente reducido. A continuación se describirá una forma particularmente ventajosa de añadir dicho material carbonoso.

Además, el proceso puede configurarse fácilmente para reciclar un cierto porcentaje de residuos sólidos de acero integrados, ya sea mediante la adición a la alimentación de finos de mineral de hierro en la etapa a) y/o a los finos de mineral de hierro precalentados obtenidos en la etapa a) y/o al hierro parcialmente reducido obtenido en la etapa b), de acuerdo con el concepto de "economía circular", con beneficios adicionales tanto ambientales como económicos.

El reformado en la presente invención se puede realizar en cualquier reactor de reformado apropiado o combinaciones de dos o más reactores de reformado, que pueden ser del mismo tipo o utilizar una tecnología diferente y son conocidos en la técnica de la producción de gas de síntesis. Los reactores de reformado son reactores de reformado catalíticos o no catalíticos y ejemplos de dichos reactores son reactores de reformado con vapor, tales como reactores de reformado con vapor catalítico (CSR), reactores de reformado en seco (DR), reactores de reformado autotérmico (ATR), reactores de oxidación parcial (POX), tales como reactores de oxidación parcial catalítica (CPO), reactores de reformado de membrana (MR), o cualquier combinación de dos o más tipos diferentes de reactores.

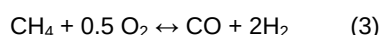
El reformado con vapor (SMR) es un proceso para producir gas de síntesis mediante la reacción de hidrocarburos con agua en forma de vapor. La reacción se puede representar mediante la siguiente reacción:



El reformado en seco (DR), también conocido como reformado de dióxido de carbono, es un proceso de producción de gas de síntesis a partir de la reacción de hidrocarburos tal como el metano con dióxido de carbono con la ayuda de catalizadores de metales nobles, como normalmente Ni o aleaciones de Ni. La reacción de reformado seco puede estar representada por:



El reformado autotérmico (ATR) utiliza oxígeno y dióxido de carbono o vapor en una reacción con metano para formar gas de síntesis. La reacción tiene lugar en una única cámara donde el metano se oxida parcialmente. La reacción es exotérmica. Cuando el ATR utiliza dióxido de carbono, la relación $\text{H}_2:\text{CO}$ producida es 1:1; cuando el ATR utiliza vapor, la relación $\text{H}_2:\text{CO}$ producida es de 2.5:1. La temperatura de salida del gas de síntesis está entre 950 y 1100 °C. Además de la reacción (1), ATR introduce la siguiente reacción:



La oxidación parcial (POX) ocurre cuando una mezcla subestequiométrica de aire y combustible se quema parcialmente en un reformador, creando un gas de síntesis rico en hidrógeno. Se distingue entre oxidación parcial térmica (TPO) y oxidación parcial catalítica (CPO).

El proceso de oxidación parcial catalítica (CPO) también se basa en la reacción (3), donde el oxígeno puede provenir del aire o del aire enriquecido con oxígeno o de una combinación de oxígeno y nitrógeno que se realiza al chocar durante unos pocos milisegundos, un reactivo premezclado gaseoso fluye a través de superficies catalíticas extremadamente caliente. La química rápida y selectiva que se origina está confinada dentro de una delgada zona de interfase sólido-gas que rodea las partículas del catalizador. Aquí, las moléculas suelen pasar muy poco tiempo a temperaturas que varían entre 600 y 1200 °C. Una cuestión clave para la explotación tecnológica es la posibilidad de evitar la propagación de reacciones a la fase gaseosa, que debe permanecer a una temperatura "relativamente baja". Esta condición favorece la formación de productos de reacción primaria (a saber, CO y H_2) inhibiendo reacciones en cadena.

Un reactor de reformado de membrana (MR) es un reactor en donde la separación de oxígeno, el reformado con vapor (SR) y la oxidación parcial (POX) se combinan en una sola etapa.

En realizaciones preferidas, el hidrógeno y/o el gas de alto horno, los gases residuales del horno de arco sumergido, los otros gases residuales de la planta metalúrgica o sus mezclas se precalientan en uno o más precalentador(es) eléctrico(s) adicionales (por ejemplo, segundo o segundo y tercero) basado(s) en el efecto Joule y/o calentamiento por microondas a una temperatura superior a 700 °C antes de alimentarlo al reactor de lecho fluidizado, preferiblemente antes de mezclarlo con el gas de síntesis (ya caliente) del reactor de reformado catalítico o no catalítico, habiéndose producido dicho gas de síntesis a partir de gas natural o biometano y, opcionalmente, un determinado porcentaje de gas de alto horno. En el caso de reactor(es) de lecho fluidizado circulante, su escape se recalienta preferiblemente antes de ser recirculado, ya sea en un calentador eléctrico separado o ventajosamente también en el segundo precalentador eléctrico.

En otras formas de realización preferidas, los finos de mineral de hierro tienen una distribución granulométrica en el rango de 0.05 a 2 mm, ventajosamente en el rango de 0.1 a 1 mm.

Si es necesario o deseado, el método comprende además en la etapa b) la formación de briquetas (en caliente) de los finos de mineral de hierro parcialmente reducido para obtener hierro parcialmente reducido en briquetas, que preferiblemente se cargan en caliente al horno de arco sumergido. Como ya se mencionó brevemente anteriormente, el material carbonoso se alimenta ventajosamente al menos parcialmente (tal como al menos un 60 % en peso, por ejemplo al menos un 80 % en peso o incluso al menos un 90 % en peso), preferiblemente de manera completa alimentado al horno de arco sumergido en combinación o mezcla con el hierro parcialmente reducido. Lo más preferiblemente, al menos parte, preferiblemente la totalidad del material carbonoso se introduce primero en el hierro parcialmente reducido briquetado durante el briquetado en caliente y luego se alimenta al horno de arco sumergido en la etapa d). En tales realizaciones, el material carbonoso se briqueta con el hierro parcialmente reducido en briquetas (mezcladas de carbono y) de hierro parcialmente reducido, listas para su uso en la etapa d). El material carbonoso agregado a las briquetas y el agregado por separado pueden ser diferentes, como carbón y biocarbón, etc. Mezclar una cierta fracción de material carbonoso fino con los finos de DRI para producir briquetas de DRI con un cierto contenido de carbono puede ser útil para optimizar el proceso de fundición eléctrica, incluido un mejor control del contenido final de C del metal caliente. La parte restante de los materiales carbonosos necesarios para la fundición de HBI se puede cargar por separado en la fundición eléctrica, como se hace en los procesos del estado de la técnica.

De hecho, en los procesos de fundición eléctrica del estado de la técnica para la fundición de hierro de reducción directa (DRI) y hierro briquetado en caliente (HBI), tal como en un horno de arco eléctrico o un horno de arco sumergido, generalmente se utiliza carbono sólido para completar la reducción con óxido de hierro: el carbón sólido se carga en la parte superior del horno eléctrico junto con otros insumos de entrada, además del contenido de carbono del DRI.

Sin embargo, los inventores encontraron que el material carbonoso añadido al hierro parcialmente reducido (antes de su alimentación al horno de arco eléctrico) es más eficiente dentro del proceso de fundición eléctrica que el material carbonoso alimentado por separado, tal como carbón/biocarbón cargado externamente. De hecho, los inventores observaron consumos menores, parámetros de proceso optimizados y un contenido de carbono más flexible que se debe alcanzar en el producto final. Los inventores admiten que estas ventajas se deben al hecho de que el material carbonoso mezclado y/o briquetado con el hierro parcialmente reducido está en forma de tamaño de grano fino y mezclado homogéneamente con los finos de hierro parcialmente reducido, haciendo más eficiente el uso del carbón en el proceso de fundición, mientras que en la carga separada de carbón se han observado algunos fenómenos indeseables, tales como arrastre de carbón con los gases residuales, carbón quemado y menor eficiencia de reducción, todo lo cual conduce a mayores consumos y menor productividad.

Un tema de particular interés es el contenido de C en el producto metálico que se requiere dependiendo de su uso y el contenido de C que se proporciona durante las primeras etapas del presente proceso debido al contexto de su instalación en acerías integradas. De hecho, para poder aprovechar la disponibilidad de los procesos aguas abajo existentes (por ejemplo, el alto horno de oxígeno), se requiere > 4 % de contenido de C (normalmente 4.5 % en peso) en el metal caliente producido, de manera similar al metal caliente de alto horno. Si se cumple este objetivo, no habrá necesidad de instalar/modificar la planta de tratamiento de metales calientes aguas abajo.

Sin embargo, el contenido de C del hierro parcialmente reducido depende en gran medida del proceso de reducción directa, y en el caso de la reducción directa basada en gas como en el presente método, un cierto contenido de C en el hierro parcialmente reducido proviene básicamente de reductores que contienen CO, tales como gas de síntesis. El uso de un gas reductor con bajo contenido de CO y, por lo tanto, mayor contenido de hidrógeno que el gas reductor procedente de procesos de reformado de gas natural comúnmente utilizados en tecnologías del estado de la técnica, significa un menor contenido de carbono en el hierro parcialmente reducido, tal como en un rango de 0.1 a 3 % en peso, dependiendo del tipo de reactor de reducción específico. Esto también significa que la sustitución total del combustible que contiene C y del reductor por hidrógeno conducirá a un hierro parcialmente reducido con un contenido de carbono nulo o casi nulo.

En particular en los casos de contenidos de carbono nulos o muy bajos, la carga directa de carbón en el horno eléctrico no es óptima para el proceso de fundición en la etapa d), lo que, como se explicó anteriormente, conduce a un mayor consumo, una menor productividad y una menor flexibilidad en las características del producto (refiriéndose principalmente al contenido de carbono en el producto metálico). Además, lo más probable es que esto aumente la huella de CO₂ del proceso general de fundición eléctrica también.

Como conclusión, la presente invención tiene como objetivo producir arrabio "verde" dentro de una acería o planta metalúrgica integrada, aprovechando la disponibilidad de gas de síntesis rico en CO mejorada por el enriquecimiento con gas de síntesis procedente del reformado catalítico o no catalítico de gas natural o biometano limitando el grado de reducción de los finos del mineral de hierro y completando la reducción en un horno de arco sumergido utilizando diferentes fuentes de energía renovables y seleccionar soluciones específicas para mejorar la viabilidad económica de la aplicación. El método es flexible para funcionar también total o parcialmente con combustible fósil y reductor, dependiendo de la disponibilidad y los costes locales específicos, de modo que se puede prever una cierta huella de

dióxido de carbono, pero limitada en comparación con las rutas del estado de la técnica e incluyendo la posibilidad de una mayor reducción hacia una mayor cantidad de recursos “verdes”, cuando estén disponibles a costes viables.

Breve descripción de los dibujos

5 A continuación se describirán realizaciones preferidas de la invención, a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos:

La figura 1 es una vista esquemática de una realización de una planta metalúrgica para producir arrabio con una huella de carbono reducida o un método para reducir la huella de carbono al operar una planta metalúrgica para producir arrabio.

10 Otros detalles y ventajas de la presente invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de varias realizaciones no limitantes con referencia al dibujo adjunto.

Descripción de realizaciones preferidas

15 La planta se alimenta de finos de mineral de hierro, incluso de baja ley, con una distribución granulométrica generalmente en el rango de 0.05 - 5 mm, así como de 0.1 - 1 mm, que podrían incluir partículas ultrafinas preaglomeradas. En este contexto, cabe señalar que los finos de mineral de hierro generalmente contienen hematita, goethita y magnetita con contenidos variables de hierro y una densidad aparente que oscila entre 1.500 y 3.500 kg/m³. Dichos finos de mineral de hierro son particularmente adecuados para métodos como los divulgados en el presente documento, que comprenden la reducción parcial cuando se fluidizan con gases reductores. Si se añaden residuos sólidos de acero integrados a la alimentación de la etapa a), preferentemente tienen tamaños de partículas similares a los de los finos de mineral de hierro. Los finos de mineral de hierro A se transportan primero desde un área de almacenamiento hasta un primer precalentador eléctrico 10. El precalentamiento se realiza mediante un precalentador eléctrico basado en efecto Joule o calentamiento por microondas, opcionalmente acoplado a un sistema de recuperación de calor, aprovechando el calor residual disponible de la siderúrgica integrada o del gas de síntesis del reactor de lecho fluidizado.

20 Los finos B de mineral de hierro precalentados se transportan luego a un sistema de carga de lecho fluidizado a través de un equipo de manipulación adecuado para el transporte de finos, tal como transportadores de cadena o transporte neumático, para ser alimentados a un reactor 50 de lecho fluidizado. El reactor 50 de lecho fluidizado es preferiblemente del tipo circulante, en donde el escape del reactor de lecho fluidizado C se recircula, preferiblemente después de ser (p)recalentado en el segundo precalentador eléctrico 20, permitiendo una flexibilidad mejorada en la distribución granulométrica de los finos, así como la óptima eficiencia del proceso, en cuanto a intercambios térmicos y tiempo de residencia.

25 Se puede usar hidrógeno verde, azul o gris (o una mezcla de ellos) D como gas reductor J en el reactor 50 de lecho fluidizado. Mediante reacciones de reducción completamente endotérmicas de óxido de hierro con hidrógeno D, otros gases residuales de plantas metalúrgicas (recirculados) H, gas de síntesis I o sus mezclas J, no sólo finos de mineral de hierro, sino preferentemente también hidrógeno y cualquier otro gas residual de plantas metalúrgicas se precalientan en uno o más precalentadores 10, 20, 30 adicionales antes de alimentarse al reactor 50 de lecho fluidizado, hasta una temperatura de aprox. 800 °C. En realizaciones preferidas, se proporciona un segundo precalentador eléctrico 20 para precalentar el hidrógeno D y el escape recirculado del reactor de lecho fluidizado C, opcionalmente acoplado con un sistema de recuperación de calor de los gases siderúrgicos disponibles; y se proporciona un tercer precalentador eléctrico 30 para precalentar los gases residuales del horno de arco sumergido y cualquier otro gas residual de la planta metalúrgica (excepto el gas de alto horno, que se alimenta al reactor de reformado catalítico o no catalítico). Esto permite reducir el consumo de hidrógeno utilizado como combustible.

35 El hidrógeno D alimentado al reactor 50 de lecho fluidizado puede sustituirse parcialmente por un gas de síntesis I y otros gases residuales (que contienen CO) de la planta metalúrgica H. Dicho gas de síntesis, rico en monóxido de carbono y con una cierta cantidad de hidrógeno, que se produce en un reactor de reformado catalítico o no catalítico o reformador 40, alimentado por gas natural y/o biometano F, gas de alto horno G, gas residual O del horno de arco sumergido y/u otros gases residuales de la planta metalúrgica H y aire o aire enriquecido con oxígeno (reformado autotérmico u oxidación parcial (catalítica), vapor (reformado autotérmico o reformado con vapor) o dióxido de carbono (reformado en seco) E dependiendo de la tecnología de reformado utilizada, ver reacciones (1) a (3) arriba. En otras palabras, si se utilizan gases residuales O del horno de arco sumergido y/u otros gases residuales H de la planta metalúrgica, se pueden utilizar como tales o con reformado previo, o ambos. La principal ventaja de este “reciclaje” es la reducción del consumo de hidrógeno, aprovechando la disponibilidad de gas rico en CO con poder calorífico limitado, tal como el gas de alto horno, que puede utilizarse de manera más eficiente en un proceso de reducción que para la producción de energía. Además, el uso de gas de síntesis que contiene CO en el reactor 50 de lecho fluidizado proporciona beneficios al proceso, debido a la reacción exotérmica de combustión de CO con liberación de calor y a un cierto contenido de carbono que permanece en el hierro K o L parcialmente reducido, con la consiguiente reducción del consumo de material carbonoso M, tal como carbón/biocarbón, en el horno de arco sumergido 70, proceso de reducción más eficiente en el horno de arco sumergido 70 y fenómenos de reoxidación limitados en el manejo de

hierro K o L parcialmente reducido en caliente. El material carbonoso M también puede comprender otros aditivos, tales como agentes formadores de escoria, etc.

El hierro K parcialmente reducido en forma de finos, con un grado de metalización previo a la reducción limitado, por ejemplo, alrededor del 60-70 % se descarga y se transporta desde el reactor en una atmósfera inerte (por ejemplo, nitrógeno o argón) para evitar fenómenos de reoxidación. Luego, los finos de hierro K parcialmente reducidos se alimentan directamente al horno de arco sumergido 70, o preferiblemente se briquetan en caliente en una unidad de briquetas en caliente 60 para mejorar sus características mecánicas, antes de ser manipulados al sistema de carga del horno de arco eléctrico aguas abajo. La selección entre la carga de hierro parcialmente reducido en caliente en un horno de arco sumergido como finos o briquetas depende de las condiciones específicas del proyecto (tales como las características de las materias primas, los servicios públicos, el precio, etc.), lo que afecta el diseño y el rendimiento del horno de arco sumergido. Si lo requiere el proceso de briquetado en caliente (dependiendo del tipo de equipo específico), los finos de hierro parcialmente reducidos en caliente, descargados del reactor de lecho fluidizado a una temperatura de 600-650 °C, se pueden calentar hasta 700-750 °C, a través de por ejemplo, un tercer calentador eléctrico (por ejemplo, basado en el concepto de efecto Joule o en calentamiento por microondas). En realizaciones ventajosas, al menos parte del material carbonoso se puede alimentar al horno de arco eléctrico en combinación o mezcla con el hierro parcialmente reducido. Es particularmente beneficioso introducir al menos parte del material carbonoso dentro del hierro reducido en briquetas. De hecho, el concepto de briquetar en caliente los finos parcialmente reducidos con una cierta cantidad de material carbonoso, tal como carbón, es ventajoso para optimizar el proceso de fundición. En comparación con la briquetación en caliente de finos de hierro parcialmente reducida sin material carbonoso, esta solución beneficiosa para ayudar a facilitar una alimentación adecuada al horno eléctrico puede incluir además:

- la instalación de equipos de manipulación adicionales, tales como en atmósfera inerte, para la manipulación y mezcla de materiales carbonosos (tal como el carbón) con hierro parcialmente reducido,

- un diseño de máquina briquetadora en caliente preferiblemente modificado (por ejemplo, tamaño, presión, etc.) para que sea adecuado para tratar las diferentes alimentaciones de entrada,

- opcionalmente, un dispositivo de precalentamiento de material carbonoso (por ejemplo, hasta 200 °C – 400 °C), si así lo requiere el proceso de briquetado en caliente, dependiendo de las propiedades específicas del material carbonoso y de los finos de hierro parcialmente reducidos (principalmente: temperatura, grado de metalización del hierro parcialmente reducido, cantidad de material carbonoso, etc.).

Dicho material carbonoso y briquetas de hierro parcialmente reducido permiten homogeneizar y compactar la mezcla de material carbonoso y finos de hierro parcialmente reducidos para limitar la pérdida de eficiencia de la carga de material carbonoso externo en la fundición eléctrica, principalmente debido al arrastre de carbón, quemado y granulometría más gruesa.

El sistema de briquetas (y posiblemente aguas arriba y aguas abajo del mismo) estará configurado preferiblemente para funcionar bajo una atmósfera inerte para evitar una reoxidación indeseable del hierro parcialmente reducido.

El hierro parcialmente reducido en forma de finos K o briquetas L (que contengan material carbonoso o no) se carga entonces en caliente a aprox. 700 °C en la fundición eléctrica, horno de arco sumergido tipo 70, donde la reducción, finalización y fundición se realiza mediante un material carbonoso M (contenido en las briquetas L y/o añadido por separado).

Para una producción de arrabio completamente libre de dióxido de carbono, en la invención propuesta, se utiliza biocarbón como material carbonoso M (reductor) en el horno de arco sumergido 70 (agregado como parte de las briquetas L y/o parcialmente), en lugar del carbón fósil utilizado convencionalmente, tal como la antracita o el coque. El biocarbón se puede producir mediante un proceso de torrefacción de biomasa, incluyendo eventualmente un cierto porcentaje de madera de demolición (hasta un 40 %) y residuos de plástico (hasta un 20 %). Las características del biocarbón dependen del tipo de biomasa de entrada y del proceso de torrefacción, siendo en cualquier caso adecuado para su uso en el horno de arco sumergido 70.

El horno de arco sumergido 70 también es capaz de reciclar un cierto porcentaje de residuos sólidos de acerías integradas como inyección de desechos sólidos N, tales como por ejemplo polvo y lodos de alto horno u horno de oxígeno básico, cascarillas de molino, polvo de desempolvado, etc. El reciclaje de residuos sólidos mejora la viabilidad de la aplicación de la presente invención, así como el beneficio ambiental, debido a la evitación del vertido, la recuperación del contenido de hierro, carbono y zinc de los residuos sólidos. Se puede inyectar directamente en el baño metálico del horno un caudal de residuos de hasta el 5 % del total de la alimentación de entrada del horno de arco sumergido, en forma de polvo seco (humedad < 3 %) con una granulometría del 100 % < 250 micrómetros. Los residuos húmedos y/o gruesos deben tratarse previamente en una secadora y/o un molino antes de la inyección en un horno eléctrico de arco sumergido, mientras que el polvo fino y con poca humedad (como por ejemplo el polvo de almacén, el polvo BOF,...) se pueden inyectar directamente sin ningún tratamiento previo. En caso de un caudal de inyección de residuos sólidos superior al 5 % del total de la alimentación de entrada al horno de arco sumergido, los residuos adicionales pueden cargarse por encima en forma de gránulos secos o briquetas frías, después de un

adecuado tratamiento de aglomeración en frío, que consiste en mezclar, peletizar o briquetar y proceso de secado. En el caso de residuos sólidos que contienen carbono, como por ejemplo lodos y polvo de altos hornos, no se requiere biocarbón adicional para reducir el mineral de hierro residual y se puede obtener un ahorro general en el consumo de biocarbón (o carbón).

- 5 La flexibilidad de las operaciones de fundición eléctrica de tipo horno de arco sumergido permite aceptar también una calidad no óptima de briquetas de hierro parcialmente reducidas y una cierta cantidad de finos de briquetas de hierro parcialmente reducidas procedentes del cribado de briquetas en caliente; esto mejora la disponibilidad del proceso de briquetado en caliente, evitando total o parcialmente la recirculación interna de finos.

- 10 El gas reductor caliente J alimentado al lecho fluidizado 50 puede ser una mezcla de diferentes proporciones de hidrógeno D, del gas residual O del horno de arco sumergido rico en CO, de otros gases residuales metalúrgicos recirculados H y del gas de síntesis I producido en el reactor/reformador de reforma catalítica o no catalítica 40 alimentado por gas natural o biometano F, gas de alto horno G, gas residual O del horno de arco sumergido y/u otros gases residuales de la planta metalúrgica H y aire enriquecido con oxígeno, vapor o dióxido de carbono E: El producto de este reactor de reformado catalítico o no catalítico 40 es un gas de síntesis I adecuado para usarse como gas reductor J en el reactor de lecho fluidizado, por ejemplo, reemplazando una cierta cantidad de hidrógeno u otros gases residuales recirculados. Esta opción puede tener una ventaja OpEx significativa debido a la sustitución de una cierta cantidad de hidrógeno D con el gas de síntesis I producido por gas natural o biometano F y gas de horno de alto horno G, gas residual O del horno de arco sumergido y/u otros gases residuales de la planta metalúrgica H.

- 15 El método propuesto y la planta metalúrgica tienen un tamaño modular: cada reactor 50 de lecho fluidizado puede alcanzar, por ejemplo, una producción máxima de 550 kty DRI, cada horno de arco sumergido 70 un tamaño máximo de 1.5 Mtpa de arrabio caliente P.

El arrabio caliente P puede colarse posteriormente como arrabio fundido Q en una unidad de fundición 80.

Leyenda:

- 10 Primer precalentador eléctrico
- 20 Segundo precalentador eléctrico
- 30 Tercer precalentador eléctrico
- 40 Reactor reformador
- 50 Reactor de lecho fluidizado
- 60 Unidad de briquetas en caliente
- 70 Horno de arco sumergido
- 80 Unidad de fundición
- A finos de mineral de hierro
- B Finos de mineral de hierro precalentados
- C Escape del reactor de lecho fluidizado.
- D Hidrógeno
- E Aire o aire enriquecido con oxígeno, vapor o dióxido de carbono.
- F Gas natural o biometano
- G gas de alto horno
- H Otros gases residuales de plantas metalúrgicas
- I gas de síntesis
- J Gas reductor (caliente)
- K Hierro parcialmente reducido (finos)
- L Hierro parcialmente reducido (briquetas)
- M Material carbonoso (y aditivos)

- N Inyección de residuos sólidos
- O Gases residuales de hornos de arco sumergido
- P Metal caliente/arrabio fundido
- Q Arrabio fundido