

AFINO DEL ACERO.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Septiembre de 2001.

INTRODUCCIÓN.

En los procesos de fabricación del acero, ¿se obtiene en la colada la calidad, pureza y composiciones deseadas?. La respuesta a esta pregunta, en general, es no.

Cualquiera que sea el proceso de obtención del acero, siempre trae consigo la presencia de impurezas, gases, incrustaciones y segregaciones que hacen necesario la implementación de procesos de refinación posterior, comúnmente conocidos como afino del acero.

Aunque casi todo el hierro y acero que se fabrica en todo el mundo se obtienen a partir de arrabio producido en altos hornos, hay otros métodos de refinado del hierro que se han practicado de forma limitada. Uno de ellos es el denominado método directo para fabricar hierro y acero a partir del mineral, sin producir arrabio. En este proceso se mezclan mineral de hierro y coque en un horno de calcinación rotatorio y se calientan a una temperatura de unos 950 °C. el coque caliente desprende monóxido de carbono, igual que en un alto horno, y reduce los óxidos del mineral a hierro metálico. Sin embargo, no tienen lugar las reacciones secundarias que ocurren en un alto horno, y el horno de calcinación produce la llamada esponja de hierro, de mucha mayor pureza que el arrabio. También puede producirse hierro prácticamente puro mediante electrólisis, haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una disolución de cloruro de hierro. Ni el proceso directo ni el electrolítico tienen importancia comercial significativa.

Finalmente, las técnicas y procedimientos de refinación del acero, no se encuentran fácilmente en la literatura técnica, por cuanto constituyen secretos industriales, que son la base de la competitividad.

En el presente trabajo se hará una descripción de los procesos de obtención del acero, una clasificación de los métodos de afino y su descripción y, además el proceso de afino del acero fuera del horno eléctrico de arco.

1. Generalidades de la Obtención del Acero.

El acero se obtiene a partir de dos materias primas fundamentales: el arrabio obtenido en horno alto y la chatarra.

La fabricación del acero en síntesis se realiza eliminando las impurezas del arrabio y añadiendo las cantidades convencionales de Mg, Si y de los distintos elementos de aleación.

Los métodos más importantes de fabricación de aceros son los siguientes:

Métodos antiguos: Hornos de Reverbero (Siemens–Martin); Convertidor Bessemer.

Métodos modernos: Convertidor L.D.; Hornos eléctricos de arco H.E.A.; Convertidor A.O.R.; Horno de inducción.

Métodos actuales: Metalurgia secundaria en cuchara.

La metalurgia secundaria se lleva a cabo en equipos diversos, tales como cucharas, convertidores u hornos especiales.

• PROCESO DE CRISOL ABIERTO.

Cualquier proceso de producción de acero a partir de arrabio consiste en quemar el exceso de carbono y otras impurezas presentes en el hierro. Una dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1400 °C, que impide utilizar combustibles y hornos convencionales. Para superar la dificultad se desarrolló el horno a crisol abierto, que funciona a altas temperaturas gracias al precalentado regenerativo del combustible gaseoso y el aire empleados para la combustión. En el precalentamiento regenerativo los gases que escapan del horno se hacen pasar por una serie de cámaras llenas de ladrillos, a los que ceden la mayor parte de su calor. A continuación se invierte el flujo a través del horno, y el combustible y el aire pasan a través de las cámaras y son calentados por los ladrillos, con este método, los hornos de crisol abierto alcanzan las temperaturas de hasta 1.650 °C.

El horno propiamente dicho suele ser un crisol de ladrillo plano y rectangular de unos 6x10 m, con un techo de unos 2,5 m de altura. Una serie de puertas da a una planta de trabajo situada delante del crisol. Todo el crisol y la planta de trabajo están situados a una altura determinada por encima del suelo, y el espacio situado bajo el crisol lo ocupan las cámaras de regeneración de calor del horno. Un horno del tamaño indicado produce unas 100 toneladas de acero cada 11 horas.

El horno se carga con una mezcla de arrabio (fundido o frío), chatarra de acero y mineral de hierro, que proporciona oxígeno adicional. Se añade caliza como fundente y fluorita para hacer que la escoria sea más fluida. Las proporciones de la carga varían mucho, pero una carga típica podría consistir en 60.000 Kg de chatarra de acero, 11.000 Kg de arrabio frío, 45.000 Kg de arrabio fundido, 12.000 Kg de caliza, 1.000 Kg de mineral de hierro y 200 Kg de fluorita. Una vez cargado el horno, se enciende, y las llamas oscilan de un lado a otro del crisol a medida que el operario invierte su dirección para regenerar el calor.

Desde el punto de vista químico la acción del horno de crisol abierto consiste en reducir por oxidación el contenido de carbono de la carga y eliminar impurezas como silicio, fósforo, manganeso y azufre, que se combinan con la caliza y forman la escoria. Estas reacciones tienen lugar mientras el metal del horno se encuentra a la temperatura de fusión, y el horno se mantiene entre 1.550 y 1.650 °C durante varias horas hasta que el metal fundido tenga el contenido de carbono deseado. Un operario experto puede juzgar el contenido de carbono del metal a partir de su aspecto, pero por lo general se prueba la fundición extrayendo una pequeña cantidad del metal del horno, enfriándola y sometiéndola a examen físico o análisis químico. Cuando el contenido en carbono de la fundición alcanza el nivel deseado, se sangra el horno a través de un orificio situado en la parte trasera. El acero fundido fluye por un canal corto hasta una gran cuchara situada a ras del suelo, por debajo del horno. Desde la cuchara se vierte el acero en moldes de hierro colado para formar lingotes, que suelen tener una sección cuadrada de unos 50 cm de lado, y una longitud de 1,5 m. Estos lingotes, la materia prima para todas las formas de fabricación de acero, pesan algo menos de 3 toneladas. Recientemente se han puesto en práctica métodos para procesar el acero en forma continua sin tener que pasar por el proceso de fabricación de lingotes.

1.2 PROCESO BASICO DE OXIGENO.

El proceso más antiguo para fabricar acero en grandes cantidades es el proceso Bessemer, que empleaba un horno de gran altura en forma de pera, denominado convertidor de Bessemer, que podía inclinarse en sentido lateral para la carga y el vertido. Al hacer pasar grandes cantidades de aire a través del metal fundido, el oxígeno del aire se combinaba químicamente con las impurezas y las eliminaba.

En el proceso básico de oxígeno, el acero también se refina en un horno en forma de pera que se puede inclinar en sentido lateral. Sin embargo, el aire se sustituye por un chorro de oxígeno casi puro a alta presión.

Cuando el horno se ha cargado y colocado en posición vertical, se hace descender en su interior una lanza de oxígeno. La punta de la lanza, refrigerada por agua, suele estar situada a unos 2 m por encima de la carga, aunque esta distancia se puede variar según interese. A continuación se inyectan en el horno miles de metros cúbicos de oxígeno a velocidades supersónicas. El oxígeno se combina con el carbono y otros elementos no deseados e inicia una reacción de agitación que quema con rapidez las impurezas del arrabio y lo transforma en acero. El proceso de refinado tarda 50 minutos o menos, y es posible fabricar unas 275 toneladas de acero en una hora.

1.3 ACERO DE HORNO ELECTRICO.

En algunos hornos el calor para fundir y refinar el acero procede de la electricidad y no de la combustión de gas. Como las condiciones de refinado de estos hornos se pueden regular más efectivamente que las de los hornos de crisol abierto o los hornos básicos de oxígeno, los hornos eléctricos son sobre todo útiles para producir acero inoxidable y aceros aleados que deben ser fabricados según unas especificaciones muy exigentes. El refinado se produce en una cámara hermética, donde la temperatura y otras condiciones se controlan de forma rigurosa mediante dispositivos automáticos. En las primeras fases de este proceso de refinado se inyecta oxígeno de alta pureza a través de una lanza, lo que aumenta la temperatura del horno y disminuye el tiempo necesario para producir el acero. La cantidad de oxígeno que entra en el horno puede regularse con precisión en todo momento, lo que evita reacciones de oxidación no deseadas.

En la mayoría de los casos, la carga está formada casi exclusivamente por material de chatarra. Antes de poder utilizarla, la chatarra debe ser analizada y clasificada, porque su contenido en aleaciones afecta a la composición del metal refinado. También se añaden otros materiales, como pequeñas cantidades de mineral de hierro y cal seca, para contribuir a eliminar el carbono y otras impurezas. Los elementos adicionales para la aleación se introducen con la carga o después, cuando se vierte a la cuchara el acero refinado.

Una vez cargado el horno se hacen descender unos electrodos hasta la superficie del metal. La corriente eléctrica fluye por uno de los electrodos, forma un arco eléctrico hasta la carga metálica, recorre el metal y vuelve a formar un arco hasta el siguiente electrodo. La resistencia del metal al flujo de corriente genera calor que, junto con el producido por el arco eléctrico, funde el metal con rapidez. Hay otros tipos de horno eléctrico donde se emplea una espiral para generar calor.

2. Clasificación de los métodos de Afino.

Según el objeto que tratan de conseguir se clasifican en tres grandes categorías:

- **Tratamiento de desgasificación:** El acero contiene elementos perjudiciales que deben eliminarse. Entre éstos están los gases disueltos durante el proceso de fabricación; Hidrógeno; Oxígeno; Nitrógeno. Para reducir el tamaño al máximo del contenido de estos gases, en especial el Hidrógeno, se somete al acero líquido al vacío, según distintos procesos, que pueden agruparse en tres técnicas principales:

A.1.) Desgasificación del chorro de colada: Consiste en situar el recipiente receptor del acero líquido (cuchara o lingotera) en una cámara de vacío, sobre la que se ajusta la cuchara que contiene el acero líquido. El chorro de acero, por efecto del vacío, se fracciona en gotas que favorecen la eliminación de los gases.

A.2.) Desgasificación del acero en la cuchara: La cuchara se sitúa previamente en una cámara de vacío. Para facilitar la desgasificación, el acero se remueve por una corriente de gas inerte (Argón) o electromagnéticamente.

A.3.) Desgasificación por recirculación: Consiste en hacer circular repetidas veces el acero por un recipiente que actúa de cámara de vacío.

B.) Tratamiento de afino de los aceros inoxidables: La chatarra se funde en un horno eléctrico de arco de inducción. Después de colada la cuchara con el acero fundido en la cámara y hecho el vacío, se inyecta oxígeno con una lanza situada en la parte superior, que elimina el carbono con un mínimo de oxidación metálica. Al mismo tiempo, se pasa Argón a través de un tapón poroso situado en el fondo de la cuchara, para homogeneizar la masa del acero líquido.

C.) Tratamiento de homogeneización por barboteo: Consiste en la agitación del baño mediante la inyección de un gas inerte, generalmente Argón, a través del fondo de la cuchara o por una lanza.

D.) Tratamientos de desulfuración y desoxidación: Se insuflan estos productos en polvo, a través de una lanza, por medio de un gas inerte. Los productos más frecuentes para insuflar son el (SILICIO-CALCIO) "Si-Ca" y diversas escorias sintéticas. La agitación del acero por el paso del gas produce excelente homogeneidad de composición y temperatura del baño y una mejora de la limpieza.

E.) Desoxidación del acero por el carbono en el vacío o (VCD): Al ser tratado el acero en el vacío conteniendo carbono y oxígeno disueltos estos elementos reaccionan entre sí, dando origen a CO, de esta forma se elimina el oxígeno del acero sin dejar residuos sólidos (inclusiones no metálicas). El CO (gas) es eliminado del sistema (vacío), siguiendo la reacción hasta prácticamente la eliminación total del oxígeno. La deshidrogenación también es más elevada, al ser ayudada por el desprendimiento de burbujas de CO, que facilitan el arrastre del hidrógeno.

F.) Tratamientos de afino con calentamiento de acero en cuchara: Por este proceso pueden conseguirse aceros con muy bajo contenido de azufre y gases, muy limpios y con control de la morfología de las inclusiones. También se consigue excelente control de la composición y la temperatura. Las cucharas se montan con tampones porosos por los que se inyecta Argón. Una vez obtenido el grado de desulfuración deseado se añaden las ferroaleaciones requeridas obteniéndose el acero programado.

G.) Adición de Aluminio y Calcio por medio de alambre o de proyectiles: El alambre se introduce a gran velocidad en el acero mediante un mecanismo especial. Al mismo tiempo se remueve el acero de la cuchara inyectando Argón. En el caso de adición por proyección, los proyectiles se lanzan a una velocidad controlada para que almacenen el fondo de la cuchara, por medio de un aparato que funciona como una metralleta de aire comprimido.

H.) Refusión por arco bajo vacío (VAR) y bajo escoria electroconductora (E.S.R.): Por estos métodos se producen lingotes de acero de gran pureza. Ambos métodos consisten en la refusión de un electrodo de la composición química deseada, en un crisol enfriado por agua, realizándose simultáneamente la fusión del electrodo y la solidificación del acero.

3. Proceso de la Fábrica Gerdau AZA.

Como se mencionó en la introducción, pocas empresas describen en detalle o con alguna profundidad, el proceso que realizan para obtener el acero bajo especificaciones deseadas.

Transcribo a continuación el proeco Gerdau AZA.

El proceso metalúrgico que se desarrolla atraviesa por dos etapas, denominadas: fusión y afino.

Durante la fusión, toda la carga pasa de estado sólido a líquido.

En el afino, ocurre un conjunto de reacciones químicas en la masa líquida, las que permiten obtener la composición y purezas deseadas. Durante esta etapa, se inyectan al horno, importantes cantidades de oxígeno para remover y extraer las impurezas. Las diferentes calidades del acero Gerdau AZA se obtienen así, de un

cuidadoso control en la composición química y mediante la adición de ferroaleaciones.

Cuando el acero líquido cumple con las especificaciones requeridas, se retira mediante una cuchara en la nave de Acería. La cuchara con su contenido de acero líquido a 1.700°C, es luego trasladada a la máquina de colada continua. Con este equipo, se aplica un proceso distinto al convencional para transformar el acero líquido, en un producto semiterminado: la palanquilla.

El acero líquido que se encuentra en la cuchara de colada, es transferido a una artesa o distribuidor llamado TUNDISH, desde donde pasa a las vías de colada. Desde el TUNDISH el acero cae dentro de tres lingoteras de cobre de doble pared, refrigeradas por agua. Las lingoteras, tienen una sección cuadrada que puede medir 130x130 mm de lado, en ellas comienza la solidificación del acero, con la formación de una delgada cáscara superficial solidificada que contiene un núcleo de metal aún líquido.

Para ayudar a acelerar la formación de dicha cáscara, las lingoteras tienen un movimiento de oscilación vertical.

Después de dejar las lingoteras, el acero superficialmente sólido, es tomado por juegos de rodillos refrigerados con chorros de agua a alta presión. Durante el paso por los rodillos, el acero se solidifica completamente y ya convertido en palanquilla, es enderezado y cortado automáticamente a la medida deseada, por medio de sopletes cortadores.

3.1 PROCESO DE VACIO (DESGASIFICACIÓN) DEL ACERO FUNDIDO.

Después de ser producido en cualquiera de los hornos de fabricación de acero, el acero derretido puede refinarse aún más para producir acero de alta pureza y homogeneidad. Esto se logra removiendo los gases (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) en el acero derretido que fueron absorbidos o formados durante el proceso de fabricación.

Si los gases no se remueven antes que el acero se solidifique, su presencia o sus con otros elementos en el acero puede producir defectos tales como: inclusiones (partículas sólidas de óxido), sopladuras (bolsas de gas), descascarillamiento (grietas internas) y fragilidad (pérdida de ductibilidad).

La desgasificación del acero fundido se lleva a cabo exponiéndolo a un vacío. La presión enormemente reducida sobre la superficie del líquido permite que los gases escapen.

El acero fundido puede desgasificarse de varias maneras. Las dos más comunes son:

DESGASIFICACION POR FLUJO

DESGASIFICACION EN LA OLLA DE COLADA.

DESGASIFICACION POR FLUJO

En este proceso, el acero fundido se vierte desde la olla de colada dentro de una lingotera, la cual está completamente encerrada en una cámara de vacío. Mientras el flujo de acero fundido cae dentro del vacío, se separa en gotitas. Debido a la reducida presión sobre el líquido, los gases disueltos revientan y se extraen fuera de la cámara por medio de una bomba de vacío.

Libre ya de gases en la lingotera, éste se solidifica en un acero de alta pureza.

3.2 DESGASIFICACION EN LA OLLA DE COLADA.

En este proceso, el acero derretido se desgasifica en la olla de colada. Se hace descender un recipiente de vacío calentado de modo que su boquilla de absorción quede por debajo del nivel líquido del acero fundido.

La presión atmosférica impulsa el acero fundido hacia arriba dentro de la cámara de vacío, en donde los gases revientan y se extraen mediante la bomba de vacío. La elevación del recipiente de vacío permite que el acero fundido fluya de vuelta, por la fuerza de gravedad, dentro de la olla de colada. Este ciclo se repite varias veces hasta que la totalidad el acero fundido en la olla se ha desgasificado.

4. Procesos de afino del acero

fuera del horno eléctrico de arco.

Los procesos de afino fuera del horno eléctrico, también llamados secundarios, están dirigidos a eliminar las inclusiones, los gases y la segregación. La metalurgia de estos procesos se basa en el afino en vacío, en la reducción de la presión parcial del CO, en la refusión y en la solidificación dirigida.

Para poder hacer comparaciones metalúrgicas, estableceremos una clasificación por grupos, según que el afino metalúrgico se lleve a efecto en vacío o no y que las materias primas sean acero líquido o sólido.

Grupo 1. Se incluyen en este grupo procesos metalúrgico de afino que tienen lugar en vacío y en los que parte de la materia prima es acero líquido.

Afino en vacío sin aportación térmica: BV, DH, RH, KD, GAZIL.

Afino en vacío con aportación térmica: ASEA-SKF, FINKL.

Afino en vacío con O₂: WITTEN, V-R, ASV, AVR.

Grupo 2. Comprende los procesos metalúrgicos de afino que tienen lugar en vacío partiendo de materia prima sólida.

- Refusión por haz de electrones: EB (electron beam).
- Refusión por electrodo en vacío VAR (vacuum arc-remelting).
- Fusión y afino en alto vacío con aportación térmica: H de I en V (VIM) AIRCO-TEMESCAL.

Grupo 3. Comprende los procesos metalúrgicos de afino que tiene lugar sin vacío partiendo de materia prima sólida.

- Descarburación por argón-oxígeno: AOD.
- Descarburación por vapor de agua-oxígeno: UDDERHOLM.
- Descarburación por argón-nitrógeno-oxígeno: AOD-N₂.

Grupo 4. Comprende el proceso metalúrgico que tiene lugar sin vacío partiendo de la materia prima sólida.

- Refusión de electrodo bajo escoria electroconductura: ESR o ESU.

4.1 GRUPO 1.

Efecto del vacío en los gases disueltos en el acero.

La ley de acción de masas se aplica a los equilibrios

H_2 y CO , $C+O$ y Si

La eliminación del H_2 es fácil, pues no forma compuestos estables en el acero, mientras que la del N_2 es más difícil, ya que forma nitruros estables.

La afinidad de los elementos desoxidantes corrientes, como el Si , Ti , Al , Etc. (fig 1), no depende de la presión.

El carbono es el único elemento de utilización industrial que origina una fase de desoxidación gaseosa y constituye un enérgico desoxidante, igual que el Al o el Ti , pero al ser sensible a las variaciones de presión, resulta más versátil que éstos. A $1600^\circ C$, el Al_2O_3 es reducido por el C ($p < 2.3$ Torr de presión). Los óxidos de Si y Mg son igualmente reducidos por el C en vacío y, mientras que el Al y el Si pasan al acero, el Mg se volatiliza.

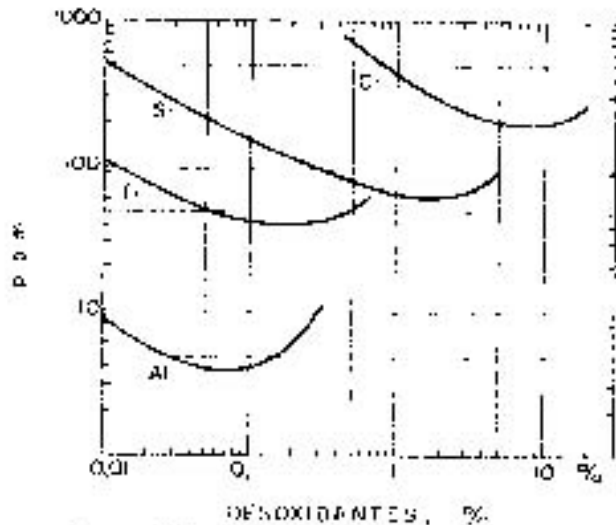


Fig. 1.-Presión desoxidante de algunos elementos

El examen de las energías libres de las reacciones de formación de los óxidos evidencia la posibilidad de la reducción de los óxidos metálicos por el C (fig. 2). Este es el fundamento del afino por vacío en muchos nuevos procesos, consiguiéndose con ellos aceros mucho más limpios, al hacerse desoxidación vía CO .

La metalurgia del vacío se introdujo hacia el año 1955. Las roturas catastróficas que se produjeron en varias centrales eléctricas de Estados Unidos aceleraron la puesta en marcha de los procesos alemanes de desgasificación por vacío (eliminación del H_2). La ley de Siebert rige el fenómeno y basta un vacío menor de 10 Torr para bajar el O_2 a niveles inocuos. El vacío elimina parcialmente el H_2 , O_2 y el N_2 .

El acero fabricado en horno eléctrico convencional con escoria básica y reductora (calmado en horno) contiene:

H_2 4 a 80 ppm 0.0004 – 0.0008 %

N_2 80 a 100 ppm 0.0080 – 0.0100 %

O_2 50 a 80 ppm 0.0050 – 0.0080 %

El acero fabricado en horno eléctrico convencional y desgasificado en vacío contiene:

H₂ 1 a 2 ppm 0.0001 – 0.0002 %

N₂ 40 a 80 ppm 0.0040 – 0.0080 %

O₂ 20 a 50 ppm 0.0020 – 0.0050 %

El acero desgasificado en alto vacío (10⁻² a 10⁻⁴ Torr) contiene:

H₂ < 1 ppm. N₂ < 20 ppm.

O₂ < 10 ppm.

Con contenidos de H₂ inferiores a 2 ppm no hay problemas de copos y la segregación disminuye de forma importante.

El vacío se emplea con objetivos diferentes:

- Eliminación parcial de gases en el acero. Se elimina en parte más o menos importante de los gases disueltos en el acero.
- Desoxidación del acero por el C en vacío. Se puede eliminar la mayor parte del oxígeno disuelto en el acero (unas decenas de ppm).
- Descarburación del acero por O₂ en vacío. . Se puede descarburar a fondo el acero sin oxidarlo apreciablemente, lo que requiere eliminar unos millares de ppm de gases.

Afino en Vacío sin Aportación Térmica.

Procedimiento Bochumer Verein (BV). Consiste en una desgasificación dinámica o en chorro que sea realizada en cuchara o en tanque; el acero entra en el tanque o en la cuchara y se rompe en multitud de pequeñas gotas. Este procedimiento se emplea fundamentalmente en la desgasificación del acero para grandes lingotes (figs. 3 y 4).

Procedimiento Dortmund Holder (DH). La desgasificación se lleva a cabo en una vasija especial que se introduce parcialmente en una cuchara; al hacer el vacío en la vasija, el acero penetra en la misma y se desgasifica (fig. 5); ésta operación se repite varias veces. A través de una esclusa se pueden efectuar también adiciones.

Procedimiento Ruhr–Heraeus (RH). Es una variante del anterior; en vez de un tubo, la vasija donde se hace el vacío tiene dos; por medio del argón se hace circular el acero de la cuchara a la vasija, por la que la desgasificación se realiza en una sola operación.

Procedimiento KD. Desoxidación del acero por vacío. Este procedimiento se lleva a cabo en un tanque de vacío; el acero procedente del horno eléctrico o LD, con un contenido de Si inferior 0.07% y sin Al u otro desoxidante, se cuela en una lingotera de baja presión; el C y el O del acero se combinan, desoxidándose el acero por el C a la vez que se eliminan el H₂ y el N₂.

Procedimiento GAZIL. Desgasificación del acero por vacío en cuchara, en la que el argón se insufla por el fondo a través de un tapón poroso.

Afino en vacío por aportación térmica.

Procedimiento ASEA–SKF. El acero procedente de un horno eléctrico de arco se trasvasa a una cuchara básica de acero inoxidable austenítico para poder emplear la bobina agitadora. Según se desgasifica, el acero

se calienta, empleándose un tapa de vacío o una tapa con tres electrodos. El proceso no descarburiza y, por lo tanto, no hay eliminación de P. Este procedimiento se emplea para obtener aceros de alta y media aleación con bajos contenidos de H y alto grado de pureza.

La característica fundamental del procedimiento ASEA-SKF es que se consiguen contenidos de S muy bajos, empleando en la desoxidación del acero aluminio en polvo y mischmetal. Un equipo ASEA-SKF comprende:

- Cuchara de acero inoxidable austenítico con revestimiento neutro y básico.
- Bobina agitadora de inducción.
- Equipo de calentamiento eléctrico trifásico de arco.
- Tapa de vacío.
- Tapa para calentamiento por arco.

El tiempo del tratamiento es de 2 h 45 min y la marcha del proceso se esquematiza en la figura 8.

Procedimiento FINKL (VAD). El acero procedente de un horno eléctrico se trasvasa a una cuchara básica con buza deslizante y tapón poroso para agitación por argón. La cuchara se introduce en un tanque de vacío y se cierra con una tapa especial que lleva tres electrodos para calentamiento por arco eléctrico; a la vez se hace un vacío para degasificar el acero y afinar. La desulfuración se efectúa igual que en el horno eléctrico de arco, pero con la ventaja de una agitación continua por argón y vacío. Las adiciones de elementos aleantes y reductores se realizan en vacío a través de una esclusa.

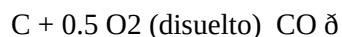
Este procedimiento se emplea para el afino de los mismos aceros que el ASEA-SKF. Los contenidos de H₂ son bajos y el grado de limpieza del acero muy bueno. El equi FINKL comprende:

- Cuchara básica o neutra con tapón poroso para argón.
- Instalación de vacío por eyectores.
- Una tapa de vacío y calentamiento por arco.
- Equipo eléctrico trifásico para calentamiento por arco.
- Tanque de vacío.

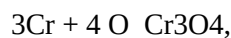
La marcha del proceso es la que se muestra en la figura 9.

Afino en Vacío con O₂.

Los procedimientos incluidos en este apartado se basan en la misma reacción. Las bajas presiones favorecen el desplazamiento hacia la derecha del equilibrio



Así mismo la preferencia de ésta reacción sobre la oxidación del Cr,



hace que sea posible la descarburación de las coladas altas en Cr sin pérdida del mismo, como se ve en el diagrama de equilibrio a presiones reducidas (Fig. 10.a).

A 1 700°C y presión normal una colada con 18% de Cr sólo puede ser descarburada hasta 0.22% de C sin oxidar el cromo (fig. 10.b). A 0.5 atm se puede descarburar 0.12% de C sin perder Cromo y a 0.1 atm hasta 0.02% de C sin pérdida de cromo.

Procedimientos WITTEN, V-R y ASV.

- En un horno eléctrico o similar se funde una colada con un contenido elevado de Cr y Ni y con un contenido de 0.5% a 1% de C.
- Al final de la fusión se homogeneiza y agrega el cromo necesario para alcanzar 18.5% de Cr y el níquel pedido en especificación. Se vuelca el acero en una cuchara básica con buza deslizante y se introduce en un tanque de vacío.
- Se hace el vacío y se inyecta O₂ puro a través de una lanza refrigerada a una velocidad de 14 m³/min, para una carga de 45T, a la vez que por el fondo de la cuchara se inyecta el argón (0.056 m³/min), consumiéndose durante el afino 0.2 m³/T.
- Se agrega la mezcla necesaria para la reducción de los óxidos de Cr y Mn de la escoria y el Si necesario para cumplir las exigencias de la especificación.
- Se elimina el vacío, se saca la tapa y se hacen las adiciones para ajustar el acero a lo establecido por la especificación, agitando con argón. Si es necesario se agrega cal-espato u otro desulfurante; se elimina así el 50% de S.
- Finalmente, si la temperatura es elevada, se puede introducir chatarra de inoxidable para enfriar.

El vacío a que se trabaja es generalmente de 20 Torr. Si se quiere fabricar un tipo L, de muy bajo contenido de carbono, se puede bajar el vacío a menos de 10 Torr.

Las diferencias entre los tres procesos residen exclusivamente en los mecanismos de toma de muestras, lanzas de O₂ y vacío empleado.

En la figura 11 puede verse el conjunto del equipo.

La tapa del tanque lleva una esclusa por donde se efectúan las adiciones sin perder el vacío. La lanza refrigerada está situada en el centro de la tapa y con una inclinación determinada va a un tubo para la toma de muestras, que se pueden extraer sin necesidad de reducir el vacío. La temperatura de trabajo se puede controlar perfectamente y no se deben superar los 1 700°C, ya que en caso contrario se elevaría el consumo de refractario.

El rendimiento del Cr es de 98–99%, y el del Mn, del 80%.

Procedimiento ALLEGHENY VACUUM REFINING (AVR).

Este proceso es similar al WITTEN, V–R y ASV, ya que el principio en que se funda es la oxidación del carbono (descarburación del acero) por O₂ en vacío, ayudándose de un equipo ASEA–SKF.

El metal procedente de un horno eléctrico de arco se trasvasa a una cuchara de acero inoxidable austenítico que lleva acoplada una bobina agitadora. La cuchara se cubre con una tapa con cierre de vacío; una lanza consumible para soplado con O₂ atraviesa la tapa y se sumerge 15 cm por debajo del nivel del acero; el desgaste de la lanza es de 2.5 cm/ min. El proceso se realiza en tres etapas.

- *Soplado con oxígeno.* El soplado se lleva a cabo de acuerdo con el contenido de carbono. Se empieza con un vacío de 170 Torr hasta bajar el carbono a 0.40%, después se intensifica el vacío hasta 30 Torr y, cuando se ha conseguido bajar el contenido de carbono a 0.10%, se hace el vacío a 1 Torr hasta finalizar el soplado.
- *Reducción.* La reducción de los óxidos de Cr y Mn se efectúa con Fe–Si–Cr y Fe–Si–Mn, cal y espato; para facilitar la reducción se insufla argón a través de un tapón poroso colocado en el fondo.
- *Terminado.* Generalmente se hace con Fe–Si y Fe–Mn afinados; sólo algunas veces se necesita realizar pequeñas adiciones de aleantes; en este caso, se puede homogeneizar el baño rápidamente por medio de la bobina. Cuando es necesario se puede emplear una tapa con tres electrodos para calentar el acero (ASEA–SKF).

4.2 Grupo II.

Comprende los procesos de afino metalúrgico en vacío partiendo de la fase sólida:

- Horno de fusión por haz de electrones (Electron Beam, EB).
- Refusión del electrodo en vacío (Vacuum Arc Remelting, VAR)
- Fusión y afino en alto vacío. Horno de inducción en vacío (VIM) y AIRCO – TEMESCAL.

Estos procesos trabajan con vacíos de 10^{-2} a 10^{-4} Torr.

Procedimiento EB. Es un proceso de fusión por medio de haces electrónicos en el que se puede partir de chatarra, viruta, esponja, etc.

Estos hornos se desarrollaron a partir del año de 1960 al empezar a fabricarse en Alemania Federal las fuentes de emisión de electrones, como son los cañones de difusión de electrones planos, circulares y anulares.

Igual que ocurre en la fusión en horno de inducción al vacío hay volatilización de oligoelementos y además pérdida de Mn.

Procedimiento VAR. Se basa en la refusión de un electrodo de composición química conocida por arco en vacío. La presión de trabajo es de 10^{-2} a 10^{-4} Torr; sin embargo, entre el electrodo y el metal líquido la presión es de 1 Torr debido al desprendimiento de gases.

Bajo la influencia del arco eléctrico, el electrodo funde en forma de gotas tan pronto como se alcanza el punto de fusión, por lo cual no hay sobre calentamiento superficial del baño líquido y la temperatura se mantiene de 15 a 40°C por encima del punto de fusión.

Análogamente al procedimiento ESR, lo ideal es tener un baño líquido lo más plano posible para evitar segregaciones. Este procedimiento permite hacer la refusión en una atmósfera determinada de Ar, N₂, etc.; además se puede refundir bajo escoria si se desea.

La eliminación del O₂ se realiza por reacción con el C para formar CO o por flotación de los óxidos, no se consigue desulfuración, pero se elimina por vaporización parte de los oligoelementos, Pb, Cu, Sn, Sb, Bi, etc.

Proceso de fusión y afino metalúrgico en alto vacío

Con aportación térmica.

Estos procesos se llevan a cabo en vacío de 10^{-2} a 10^{-4} Torr, lo cual hace necesarias instalaciones muy costosas. La colada y solidificación se hace también en vacío. Pertenecen a éste apartado los procedimientos: VIM y AIRCO–TEMESCAL.

Procedimiento VIM. La fusión en horno de inducción en vacío, o procedimiento VIM, consiste en fundir una carga sólida o en trasvasar una carga líquida afinada en un horno eléctrico de arco y desgasificado por vacío a un horno de inducción en vacío, donde se lleva a cabo la aleación y el afino. El problema principal es el revestimiento, ya que, con materiales básicos o neutros, como el Al₂O₃ o MgO, no es posible bajar el O₂ a niveles inferiores de 30 ppm al reaccionar el oxígeno del revestimiento con el carbono contenido en el acero. Los revestimientos de estos hornos se hacen con cal fundida o con cal cristalina.

No hay desfosforación y la eliminación del azufre en fase gaseosa es tanto más difícil cuanto menos es el contenido de O₂. Los oligoelementos, Pb, Cu, Sn, Bi, etc., se eliminan parcialmente por vaporización.

Procedimiento AIRCO – TEMESCAL. Se trata de una combinación de los procedimientos VIM y EB. El acero fundido en horno de inducción al vacío pasa a una cámara de vacío con horno de mantenimiento térmico

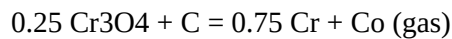
donde se corrige la composición química; desde allí fluye a un antecrisol de varias soleras planas de Cu en cascada, refrigerado por agua (fig. 12), los cañones de proyección plana de electrones (EB) compensan las pérdidas de temperatura en un vacío de 10⁻⁴ Torr.

La parte final del proceso consiste en controlar la solidificación para evitar segregaciones y dar al producto la forma adecuada.

GRUPO III.

Como se ha indicado, se incluyen en este grupo los procedimientos en los que el afino metalúrgico se hace sin vacío partiendo de fase líquida.

Estos procedimientos se conocen como AOD, UD-DERHOLM, AOD-N₂ y se basan en la reacción



$$K = \frac{(\text{Cr})^{3/4} (P_{\text{Co}})}{(\text{Cr}_3\text{O}_4)^{1/4}}$$

A una temperatura constante una reducción de la presión parcial del Co da lugar a una pérdida de carbono en el baño al reaccionar con el Cr₃O₄ o con el oxígeno aportado al mismo.

El Co se diluye con argón, N₂ o vapor de H₂O, según el procedimiento que se emplee, por lo cual y mientras en el sistema existan C y O reaccionan hasta eliminarse mutuamente.

Procedimiento AOD (Argon-oxygen decarburation). Aunque teóricamente se puede aplicar a toda clase de aceros, este procedimiento solo se emplea industrialmente para descarburar aceros con alto contenido de Cr. El acero líquido, rico en cromo y con un contenido de carbono de 0.5 a 1.0%, procedente de un horno eléctrico, se trasvasa a un convertidor a una temperatura superior a 1 500oC (fig. 13). En el proceso global cabe distinguir las siguientes etapas:

1ª Etapa. Se sopla Ar/O₂ en la proporción 3 : 1 hasta subir la temperatura a 1 630oC oxidando el silicio y parte del cromo y del carbono. La elevación de 130oC se efectúa a una velocidad de 8–10 o/min. Durante esta etapa el contenido de carbono disminuye a 0.20–0.25%, el cromo se reduce en un 0.50% y el Si se elimina.

2ª Etapa. Se baja la proporción Ar/O₂ a 2 : 1. Se sopla durante 8–10 min subiendo la temperatura hasta 1 700oC, el carbono baja a 0.09–0.1 % y se oxida un 0.5% de Cr.

3ª Etapa. Se modifica la relación Ar/O₂ a 1 : 2. Para bajar el carbono hasta 0.04% hay que eliminar un 0.06% min. No se produce aumento de temperatura por el efecto refrigerador del argón.

4ª Etapa. Reducción. Se agrega al convertidor una mezcla reductora para recuperar los óxidos de Cr y Mn que hay en la escoria y para ajustar a la especificación los contenidos de silicio y manganeso del acero, se insufla argón durante 3–4 minutos para homogeneizar. Si es necesario, la desulfuración se lleva a cabo en esta etapa, para lo que se desescoria, se agrega la cantidad de cal-espato precisa y se agita con argón durante 4–5 minutos; la temperatura baja a unos 30–50oC, lo que hay que tener siempre en cuenta. Un contenido de azufre de 0.020% disminuye a 0.012%. Se pueden hacer varios escalones de desulfuración.

Este procedimiento se emplea en la fabricación de aceros inoxidable, refractarios y para válvulas.

Procedimiento UDDERHOLM. Este procedimiento se desarrolló en Suecia, y sigue el mismo sistema AOD

con la variante de emplear vapor de agua en vez de argón.

El vapor de agua se disocia en oxígeno e hidrógeno, razón por la cual al final del soplado el acero está saturado de H₂, que mediante un gas inerte, 1 m³/T, se elimina hasta niveles de 5 cm³ / 100 g.

Este procedimiento presenta la ventaja de sustituir el argón, con lo cual el precio por tonelada de acero debe ser inferior al obtenido con el AOD.

Procedimiento AOD–N₂. Cuando se fabrican aceros L, muy bajos en carbono (C= 0.03%), el argón de la 2ª etapa se puede sustituir por N₂, con lo cual es posible reducir gastos.

En los aceros inoxidable austeníticos (aceros al Cr–Ni–Mn) que llevan nitrógeno (0.100–0.2000%) el argón se sustituye totalmente por nitrógeno.

GRUPO IV.

Este grupo se reduce a un único procedimiento, el ESR, que consiste en la refusión de un electrodo consumible bajo escoria electroconductora. Está basado en una patente americana de R.K. Hopkins perfeccionada por los rusos y posteriormente de EE.UU, Inglaterra, Alemania y Austria.

En este procedimiento se emplea el calor originado al pasar la corriente eléctrica a través de una escoria líquida para refundir el electrodo. La instalación responde al esquema que se muestra en la figura 14.

Debido a la resistencia eléctrica en la fase escoria líquida, la corriente se transforma en calor por efecto Joule, por lo que se funde el electrodo sumergido en la escoria. El intenso calentamiento de la escoria en contacto con el metal líquido repercute favorablemente en la reacción escoria–metal.

El electrodo se funde originando numerosas gotas, por lo que el contacto escoria–metal es muy bueno. Las escorias están formadas por Al₂O₃, F₂Ca , CaO y SiO₂.

La desulfuración en fase gaseosa es una característica del procedimiento ESR. El azufre de la escoria se une al O₂ del aire para formar SO₂. No se elimina H₂ y parece ser que en los diámetros superiores a 1 m hay reentrada de H₂. Por tales motivos, este sistema exige una eliminación previa de H₂ por vacío. Otra precaución a tener en cuenta es que el electrodo que se refunde debe ser homogéneo, es decir, sin segregación.

En el procedimiento ESR puede utilizarse lingotera fija o móvil y es importante que la forma del baño líquido sea siempre lo más plana posible para evitar segregaciones. El acero solidifica rápidamente en una lingotera de cobre refrigerada por agua.

Las ventajas esenciales del procedimiento se pueden sintetizar como sigue:

- Desulfuración importante y desoxidación notable (fig. 15)
- Aumento de la pureza del metal por disminución de las inclusiones no metálicas.
- Mejora sensible de la segregación.
- Obtención de estructuras de solidificación longitudinales.

CONCLUSIÓN.

los modernos métodos de producción del acero utilizan el arrabio como materia prima.

El afino se efectúa por los siguientes métodos: convertidor (hogar abierto), proceso de inyección por oxígeno (soplado) y con horno eléctrico. En el primer método el afino del arrabio se efectúa dentro de un gran

recipiente revestido de una materia refractaria y con el fondo perforado. La colada a una temperatura de 1300 °C se agrega al convertidor que se mantiene en posición horizontal que evita que el líquido alcance los orificios. El convertidor se endereza y comienza el soplado de aire una vez terminada la carga. Con esto se logra una temperatura de 1600°C. El proceso con el convertidor es muy rápido y dura alrededor de 20 minutos.

Una desventaja de este método es que no permite un control muy exacto del producto. Aquí se emplean tres tipos de procesos: hierro fundido–chatarra, hierro fundido–mineral y sólo con hierro fundido. El método de soplado consiste en introducir un tubo al recipiente justo en la superficie del arrabio, insuflando oxígeno a gran presión, que permite una reducción rápida de los componentes lográndose así un afino en un corto tiempo y con buenos resultados de calidad del acero.

Recientemente ha alcanzado gran difusión el proceso de horno eléctrico, ya sea de arco o de inducción. Con este proceso se obtienen productos de alta calidad. El horno eléctrico está constituido por un horno recubierto de una bóveda, es con frecuencia basculante para facilitar el vaciado y la colada. Se emplean hornos de arco independientes, hornos de arco directo con solera conductora o sin ella, hornos de resistencia, hornos de inducción. Los hornos eléctricos alcanzan fácilmente las 80 toneladas de arrabio y algunos las 200 toneladas, y permiten la utilización de acero homogéneo y bien desoxidado.

Otra ventaja que presentan es la de fácil control de temperatura; así mismo alcanzan rápidamente temperaturas elevadas.

También existe otro proceso para el afino que es el Dúplex, consistente en un primer afinado en el convertidor y luego se completa en el horno eléctrico.

BIBLIOGRAFÍA.

LUENGO, A. Procesos de Afino. Conferencia presentada durante la IV reunión de la sub comisión de Aceros Especiales, Sevilla, 1973–5–16.

MAERSK. Manual Del Ingeniero Mecánico.

www.infoacero.cl/aceros

www.infotrac.galegroup.com./itwen/hnv-itw

www.grippo.com.ar/argentina/english/business/metlurgica.htm

www.monografias.com

www.expoindustria.net/esq-hornocuchara.htm

Fig.3

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 4

Fig. 2