

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 636 829**

51 Int. Cl.:

G01N 3/30 (2006.01)
G01N 29/07 (2006.01)
G01B 17/02 (2006.01)
G01B 15/02 (2006.01)
F27D 21/00 (2006.01)
F27D 1/00 (2006.01)
G01N 29/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2006** **PCT/CA2006/000261**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **31.08.2006** **WO06089414**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2006** **E 06705216 (7)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.05.2017** **EP 1893972**

54 Título: **Sistemas, métodos y aparatos para la inspección sin interrupción y sin destrucción de hornos metalúrgicos y recipientes similares**

30 Prioridad:

22.02.2005 US 61630
30.09.2005 US 721977 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.10.2017

73 Titular/es:

HATCH LTD. (100.0%)
2800 SPEAKMAN DRIVE
MISSISSAUGA, ONTARIO L5K 2R7, CA

72 Inventor/es:

SADRI, AFSHIN y
WALTERS, GARY

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 636 829 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistemas, métodos y aparatos para la inspección sin interrupción y sin destrucción de hornos metalúrgicos y recipientes similares

Campo de la invención

- 5 La invención se relaciona con formas de inspeccionar hornos metalúrgicos y similares, y, en particular a sistemas, métodos y aparatos, para inspección sin interrupción y sin destrucción de hornos metalúrgicos y recipientes similares.

Antecedentes de la invención

- 10 Un horno metalúrgico típico es un recipiente que tiene paredes laterales con una construcción de multicapa. La capa exterior es típicamente un armazón de acero provisto para soporte estructural. La capa interna incluye un revestimiento refractario, construido a partir de una o más capas de ladrillos refractarios, que se proporciona para proteger la armazón exterior de acero de materiales fundidos y productos químicos agresivos dentro del horno. En algunos hornos, también se proporciona una capa de enfriamiento entre el armazón exterior de acero y el revestimiento refractario para evitar una transferencia de calor excesiva desde el revestimiento refractario al armazón exterior de acero. En algunos diseños de horno, las capas de elementos de ladrillo y/o de enfriamiento se ponen en su lugar con un material suave de arena que se solidifica durante la operación del horno.

- 20 Durante la operación de un horno metalúrgico, el revestimiento refractario se deteriora por tensión mecánica y térmica además de la degradación química, que resulta en una pérdida del espesor total del revestimiento refractario. A medida que el revestimiento refractario deteriora los materiales fundidos y los productos químicos agresivos penetran en espacios que se ensanchan en y/o entre ladrillos refractarios que conducen a la eliminación de láminas (es decir, separación) de las capas en el revestimiento refractario. El deterioro del revestimiento refractario conduce en última instancia a fallas estructurales que pueden causar que el armazón exterior de acero sea expuesto a materiales fundidos y productos químicos agresivos dentro del horno. Además, si los materiales fundidos y los productos químicos agresivos llegan al armazón de acero exterior existe un riesgo inminente de lesiones graves para el personal que trabaja cerca al horno, puesto que el armazón de acero exterior no es capaz de contener de manera confiable los materiales fundidos y productos químicos agresivos desde el interior del horno. También se sabe que la pérdida de la capacidad de transferencia de calor y la conductividad se producen como un resultado del deterioro del revestimiento refractario.

- 30 Otro modo de deterioro del revestimiento refractario, común en hornos que incluyen elementos enfriados con agua, es la hidratación del revestimiento refractario. Bajo ciertas temperaturas, el agua que se ha escapado de un elemento de refrigeración puede reaccionar con los ladrillos refractarios que causan un deterioro acelerado del revestimiento refractario. En particular, los ladrillos refractarios en base a magnesita (MgO) son susceptibles a este modo de falla.

- 35 Es deseable comprobar regularmente el espesor del revestimiento refractario, así como inspeccionar el revestimiento refractario para detectar defectos tales como agrietamiento, las eliminaciones de láminas, almacenamientos y otras acumulaciones. Es difícil hacer una evaluación confiable y precisa del espesor del revestimiento refractario sin antes vaciar el horno y cerrar el procedimiento industrial en el que está implicado el horno. El cierre de un horno metalúrgico para la inspección de rutina es costoso y los operadores intentan hacer uso de los métodos de inspección que se pueden emplear mientras el horno está operando. Sin embargo, el entorno de trabajo hostil en el que se incluyen los hornos, distorsiona las mediciones realizadas. Por ejemplo, se sabe que las temperaturas extremadamente altas en los hornos, vibraciones, ruido ambiente, polvo y riesgos eléctricos y mecánicos distorsionan las mediciones de espesor generadas por los métodos de inspección previamente conocidos. No se ha desarrollado un método sistemático para tomar en cuenta dichas fuentes de error para mejorar los métodos de inspección previos. Como un resultado, los operadores se ven obligados a cerrar y enfriar los hornos con el fin de comprobar el revestimiento refractario de vez en cuando. El documento US 2004/177692 divulgó un sistema de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1. Otro sistema conocido se divulgó en el documento EP 0335470.

Resumen de la invención

- 50 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato para inspeccionar una pared de horno metalúrgico, que comprende el aparato: una pluralidad de pares de generadores de sensores de ondas de tensión accionados por impacto, cada par para generar una onda P y reflexiones de detección de la onda P en el punto de un horno metalúrgico; caracterizado porque un procesador que tiene acceso a un código de programa que, cuando es ejecutado por el procesador, causa que el procesador produzca una determinación de la condición de la pared de horno metalúrgico que usa datos de dominio de tiempo recolectados por al menos un sensor, datos de dominio de frecuencia derivados de los datos de dominio de tiempo, y un factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura para corregir el cambio en la velocidad de la onda P y las reflexiones de la onda P a través de un material refractario incluido en la pared del horno metalúrgico.

Cada par de generadores de sensores de onda de tensión accionados por impacto puede comprender un generador de onda de tensión accionado por impacto para generar la onda P que se propaga en la pared de horno metalúrgico y un sensor de onda de tensión para detectar las reflexiones de la onda P, en la que al menos un sensor para recolectar los datos del dominio de tiempo es el sensor de onda de tensión.

- 5 El factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se puede calcular como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad en un intervalo de temperatura que corresponde a un gradiente de temperatura a través del material refractario dentro de un horno metalúrgico en operación.

La determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico puede incluir la determinación del espesor de la pared del horno metalúrgico.

- 10 La determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico puede incluir la determinación del espesor de un revestimiento refractario en la pared del horno metalúrgico.

La determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico puede incluir la determinación de la presencia o ausencia de defectos que incluyen eliminación de láminas, almacenamientos, grietas y burbujas.

- 15 La determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico también puede incluir la determinación de la posición de defectos que incluyen eliminación de láminas, almacenamientos, grietas y burbujas.

El aparato puede comprender además una pluralidad respectiva de preamplificadores acoplados entre la pluralidad de pares de generadores de sensores de onda de tensión accionados por impacto y el procesador.

El procesador puede ser causado además por el código de programa para usar un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría para producir la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico.

- 20 El sensor de ondas de tensión puede ser uno de un transductor de desplazamiento vertical y un acelerómetro.

El generador de ondas de tensión impulsado por impacto puede tener un punto de impacto esférico.

Se puede proporcionar el material refractario incluido en el horno metalúrgico en forma de ladrillo y se puede calcular el factor de escalado de velocidad dependiente de geometría como una función de las dimensiones relativas de los ladrillos refractarios.

- 25 La pared del horno metalúrgico puede incluir un revestimiento refractario que tiene una pluralidad de capas, cada una compuesta por un tipo de material refractario, y en el que el procesador puede ser causado además por el código de programa para producir una determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico que usa una pluralidad de factores de escala de velocidad dependientes de la temperatura, cada factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura correspondiente a un tipo de material refractario respectivo en el revestimiento refractario.

- 30 El factor de escalado de la velocidad dependiente de la temperatura también se puede calcular como una función de una estimación del espesor restante del revestimiento refractario, de tal manera que el espesor restante se usa para establecer los límites de un gradiente de temperatura a través del revestimiento refractario.

- 35 Cada uno de la pluralidad de factores de escala de velocidad dependientes de la temperatura se puede calcular como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad en un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través del material refractario correspondiente.

Se puede causar el procesador además por el código de programa para usar un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría para producir la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico.

- 40 Cada capa del revestimiento refractario puede incluir ladrillos refractarios de un tipo de material refractario y cada uno de la pluralidad de factores de escalado de velocidad dependientes de la geometría pueden calcularse como una función de las dimensiones relativas de los ladrillos refractarios en una capa respectiva.

El cálculo del factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura puede procesarse iterativamente teniendo en cuenta estimaciones actualizadas del espesor restante del revestimiento refractario hasta que se encuentre un rendimiento significativo decreciente.

- 45 El procesamiento iterativo puede detenerse cuando el rendimiento decreciente está indicado por un cambio de menos del 2% en la estimación del espesor restante del revestimiento refractario.

Uno de los factores de escala de velocidad dependientes de la temperatura y la velocidad de la onda P se pueden ajustar para tener en cuenta un cambio relativo en la densidad de los materiales en el revestimiento refractario.

- 50 En un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona un método para inspeccionar una pared del horno metalúrgico que comprende: introducir una onda P en una pared del horno metalúrgico en un punto; y detectar una o

más reflexiones de la onda P cerca del punto de introducción de la onda P en la pared del horno metalúrgico; caracterizado por procesar las reflexiones en el dominio de tiempo y frecuencia en combinación con un factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura para corregir el cambio en la velocidad de la onda P y las reflexiones de la onda P a través de un material refractario incluido en el horno de pared metalúrgico.

- 5 El factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se puede calcular como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad en un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través del material refractario dentro de un horno metalúrgico en operación.

El método puede comprender además la determinación del espesor de la pared del horno metalúrgico.

- 10 El método puede comprender además la determinación del espesor del revestimiento refractario en la pared del horno metalúrgico.

El método puede comprender además la determinación de la presencia o ausencia de defectos que incluyen eliminación de láminas, almacenamientos, grietas y burbujas.

El método puede comprender además la determinación de la posición de los defectos presentes en la pared del horno metalúrgico.

- 15 El método puede comprender además la amplificación de reflexiones detectadas antes del procesamiento.

El método puede comprender además la inclusión de un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría en la producción de la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico.

- 20 Se puede también calcular el factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura como una función de la estimación del espesor restante del revestimiento refractario, de tal manera que se use el espesor restante para establecer los límites de un gradiente de temperatura a través del revestimiento refractario.

Se procesa iterativamente el cálculo del factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura tomando en cuenta las estimaciones actualizadas del espesor restante del revestimiento refractario hasta que se encuentra un rendimiento decreciente significativo.

- 25 El procesamiento iterativo puede detenerse cuando el rendimiento decreciente está indicado por un cambio de menos del 2% en la estimación del espesor restante del revestimiento refractario.

Se puede ajustar uno de los factores de escalado de velocidad dependientes de la temperatura y la velocidad de la onda P para tener en cuenta un cambio relativo en la densidad de los materiales en el revestimiento refractario.

Otros aspectos y características de la presente invención serán evidentes, para aquellos expertos de manera ordinaria en la técnica, tras la revisión de la siguiente descripción de las realizaciones específicas de la invención.

- 30 Breve descripción de los dibujos

Para un mejor entendimiento de la presente invención, y para mostrar más claramente cómo se debe llevar en efecto, se hará referencia ahora, a manera de ejemplo, a los dibujos que acompañan, que ilustran aspectos de las realizaciones de la presente invención y en los que:

La Figura 1 es un dibujo de corte transversal de un horno metalúrgico de ejemplo simplificado;

- 35 La Figura 2A es una primera gráfica de ejemplo que muestra que una elasticidad de un material refractario incluida en el horno metalúrgico de la Figura 1 es dependiente de la temperatura;

La Figura 2B es una segunda gráfica de ejemplo que muestra que una elasticidad de otro material refractario incluido en el horno metalúrgico de la Figura 1 es dependiente de la temperatura;

- 40 La Figura 3 es una ilustración simplificada que muestra un sistema de inspección de un Sensor Individual de Impacto Individual (SISS) de acuerdo con una realización de la invención en combinación con el horno metalúrgico mostrado en la Figura 1;

La Figura 4 es una vista en perspectiva simplificada de un segmento a través de la pared del horno metalúrgico directamente bajo un sistema de impacto y sensor del sistema de inspección SISS mostrado en la Figura 3;

- 45 La Figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo muy específico de acuerdo con una realización de la invención para uso con el sistema de inspección SISS mostrado en la figura 3;

La Figura 6 es una ilustración simplificada que muestra un sistema de inspección de Múltiples Sensores de Impacto Individual (SIMS) de acuerdo con otra realización de la invención en combinación con el horno metalúrgico mostrado en la Figura 1;

La Figura 7 es un dibujo esquemático simplificado de un sistema de inspección de Múltiples Sensores de Impacto Múltiple (MIMS) de acuerdo con aún otra realización de la invención; y

La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo muy específico para determinar la profundidad del defecto en un revestimiento refractario de un horno metalúrgico de acuerdo con aspectos de la invención.

5 Descripción detallada de la invención

La inspección del revestimiento refractario de un horno metalúrgico es un procedimiento retador que típicamente requiere vaciado, cierre y enfriamiento del horno para evaluar confiablemente la condición del revestimiento refractario. El cierre de un horno puede costar a los operadores cantidades significativas en ingresos perdidos, horas-hombre y otros gastos. En algunos casos, ciclos repetitivos de enfriamiento y recalentamiento, necesarios para cerrar rutinariamente un horno para inspección, conducen a un deterioro más rápido del revestimiento refractario.

Desafortunadamente, los métodos previamente conocidos de determinación de la condición actual de un revestimiento refractario, mientras que está funcionando un horno metalúrgico, proporcionan resultados defectuosos. Los resultados son defectuosos porque los métodos de inspección previamente conocidos se basan en modelos cuantitativos que se basan en supuestos poco realistas sobre el estado de los materiales refractarios en el horno. Por ejemplo, los modelos en lo que se basó anteriormente invocados no toman en consideración los efectos de temperaturas extremadamente altas sobre las propiedades del material refractario. Por consiguiente, se ha visto que las mediciones de espesor se han disminuido tanto como 30% hasta 100% usando estos métodos previamente conocidos. Por lo tanto, con el fin de evitar accidentes costosos y peligrosos, los operadores de tales hornos se han visto obligados a cerrar rutinariamente sus hornos para evaluar confiablemente la condición del revestimiento refractario.

Por el contrario, algunas realizaciones de la presente invención proporcionan sistemas, métodos y aparatos para determinar con mayor precisión el espesor de un revestimiento refractario incluido en un horno metalúrgico en operación. En algunas realizaciones se usa una onda de tensión propagada transitoriamente, tal como una onda de tensión compresiva (es decir, longitudinal, primaria, etc.), para determinar la condición de un revestimiento refractario. Las reflexiones de la onda de tensión se evalúan para identificar la presencia y la posición de defectos tales como, por ejemplo, grietas, eliminación de láminas y burbujas en el revestimiento refractario además del espesor restante total del revestimiento refractario. En algunas realizaciones, la onda de tensión propagada transitoria incluye frecuencias que varían desde el acústico (es decir audible) al ultrasónico (es decir, no audible). Por ejemplo, una onda de tensión generada de acuerdo con una realización de la invención puede tener un intervalo de frecuencias de 100 Hz a 80 kHz. Este intervalo de frecuencias puede ser ventajoso en muchos escenarios ya que las ondas de tensión ultrasónicas por sí solas típicamente carecen de suficiente energía para pasar a través de revestimientos refractarios gruesos y generalmente experimentan una rápida atenuación a través de masas heterogéneas sólidas.

Adicionalmente, algunas realizaciones de la presente invención proporcionan una manera sistemática para incluir el efecto que tiene la temperatura sobre la velocidad de una onda de tensión compresiva a través de un material refractario calentado y/o almacenamientos. Como se identifica en aspectos de la presente invención, y contrariamente al entendimiento común en la técnica, la velocidad de una onda de tensión, en cada frecuencia y en un material refractario, no es necesariamente constante en un intervalo de temperatura. De acuerdo con aspectos de algunas realizaciones específicas de la invención, se puede calcular un factor de escalado α para cada material refractario para ajustar la velocidad presunta de la onda de tensión a través de cada material refractario. El factor de escalado α para un material refractario particular es una función del módulo de elasticidad E y de la temperatura y/o del gradiente temperatura a través de aquel material refractario. En algunas realizaciones muy específicas, el factor de escala α se calcula como una función del cambio relativo en el módulo de elasticidad E en un intervalo de temperatura que corresponde al gradiente de temperatura a través de una capa de un tipo de material refractario. Como se describirá en mayor detalle a continuación, esto es una desviación significativa de lo que se conoce en la técnica, ya que se asumió previamente como inexistente un cambio en el módulo de elasticidad E y el efecto correspondiente en la velocidad de una onda de tensión a través de un material refractario particular.

El módulo de elasticidad para un material E es una relación cuantitativa entre tensión y deformación en aquel material. Para metales (por ejemplo, acero, plomo, cobre, etc.) se entiende comúnmente que a medida que aumenta la temperatura el comportamiento de deformación de un metal cambia de elástico a plástico. En consecuencia, se considera generalmente más fácil deformar un metal a temperaturas más altas que a temperaturas más bajas. En otras palabras, menor tensión induce las mismas o mayores deformaciones dentro de un metal a temperaturas más altas en comparación con temperaturas más bajas. Esta relación entre la tensión y la deformación se cuantifica a menudo como el módulo de elasticidad E , que se calcula comúnmente como una proporción de tensión a deformación. El cambio en el comportamiento de deformación (del elástico al plástico) se debe al debilitamiento de una estructura de rejilla metálica a temperaturas más altas que a su vez permite que los átomos de metal fluyan más fácilmente. Eventualmente, se alcanza la temperatura del punto de fusión y un metal sólido cambia a un líquido. Para el acero el punto de fusión es de aproximadamente 1500°C.

Los materiales refractarios tienen una estructura de celosía muy fuerte y las altas temperaturas generalmente no causan que un material refractario se funda y/o se comporte de una manera que se puede categorizar como plástico. Los materiales refractarios también tienden a ser mucho más frágiles que los metales. Como un resultado, las características de fusión y deformación de metales descritos anteriormente no se encuentran en materiales refractarios. Por el contrario, los materiales refractarios simplemente tienden a romperse, agrietarse y/o desintegrarse en un polvo mientras permanecen en el régimen elástico.

En términos cuantitativos, el módulo de elasticidad E de un material refractario no cambia significativamente como una función de la temperatura de una manera que es comparable al cambio observado en los metales. De hecho, el módulo de elasticidad E para un material refractario particular se considera típicamente como una constante. Los cambios aparentemente insignificantes en un módulo de elasticidad E no se consideraron previamente importantes cuando se consideraron las propiedades de un material refractario en relación con los usos previstos para ese material refractario. A pesar de no tener un impacto significativo sobre las propiedades estructurales y aislantes de un material refractario, un cambio relativo en el módulo de elasticidad E, identificado como un aspecto de la presente invención, puede tener un impacto significativo sobre la velocidad de una onda de tensión en el material refractario.

Volviendo de nuevo al uso de ondas de tensión, una perturbación por choque o impulso a un sólido induce una serie de desplazamientos lineales y angulares dentro de aquel sólido. Específicamente, en un material refractario la perturbación de choque o impulso aplicada genera diversos tipos de ondas de tensión. Las ondas de tensión pueden clasificarse como ya sea ondas corporales o superficiales. Las ondas corporales viajan a través de un sólido, mientras que las ondas superficiales viajan principalmente a lo largo de la superficie del sólido.

Dos tipos significativos de ondas corporales son ondas Primarias (es decir, ondas P, ondas longitudinales, ondas compresivas, etc.) y ondas Secundarias (es decir, ondas S, ondas de cizallamiento, etc.). Las ondas P inducen movimiento de partícula en la misma dirección que la trayectoria de desplazamiento del frente de onda. Es decir, como una onda P pasa a través de un sólido, las partículas vibran aproximadamente a una posición de equilibrio, en la misma dirección que la onda P está viajando. Las ondas P también causan compresión y rarefacción, pero no la rotación de un material refractario. Por otro lado, las ondas S inducen el movimiento de partículas perpendicular a la trayectoria de desplazamiento al frente de onda. Es decir, como una onda S viaja a través de un cuerpo, el desplazamiento de partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda S. Las ondas S también causan cizallamiento y rotación, pero no hay cambios de volumen de un material refractario.

En muchas realizaciones de acuerdo con la invención, las ondas P y las reflexiones de las ondas P se evalúan para determinar la condición de un revestimiento refractario de un horno metalúrgico en operación. Las ondas P generalmente se consideran las más rápidas de las ondas de tensión y se sabe que viajan a través de sólidos, líquidos y gases. Por consiguiente, las mediciones relativas al espesor de un revestimiento refractario y la presencia y posición de almacenamientos y defectos en el revestimiento refractario se pueden determinar usando datos recolectados sobre la propagación de ondas P a través de las paredes de un horno metalúrgico en operación independientemente del estado de la materia en cualquier punto dentro de las paredes. Como se ha indicado anteriormente, algunas realizaciones de la invención proporcionan un método mediante el cual se puede considerar con mayor precisión el efecto de la temperatura sobre la velocidad de la onda P, a través de un material refractario incluido en una pared del horno.

Se acepta generalmente que la ecuación de onda fundamental (1) es adecuada para relacionar la velocidad V_p de una onda P con la frecuencia f y la longitud de onda λ de la onda P. La velocidad V_p de una onda P en un material refractario particular y la densidad ρ del material refractario pueden multiplicarse conjuntamente para determinar la impedancia acústica Z para ese material refractario, como se muestra en la ecuación (2). La impedancia acústica Z proporciona un valor que es útil para estimar la cantidad de energía que se refleja a partir de una interfaz entre dos materiales.

$$V_p = f \times \lambda \quad (1)$$

$$Z = \rho \times V_p \quad (2)$$

Sin embargo, cuando se usan para analizar un horno en operación, las ecuaciones (1) y (2) producen resultados inexactos derivados de supuestos hechos sobre la longitud de onda λ y la frecuencia f de una onda P en un material refractario calentado. Las temperaturas extremadamente altas dentro de un horno operativo resultan en cambios no lineales en la longitud de onda λ y en la frecuencia f de una onda P, que no son observables precisamente u observables dado el ambiente de trabajo hostil en el que se incluyen los hornos. Como un resultado, se encuentran errores significativos cuando se usan métodos previamente conocidos de inspección de hornos metalúrgicos en operación.

Alternativamente, y de acuerdo con algunas realizaciones de la invención, la velocidad V_p de una onda P en un material refractario también se puede determinar a partir de la densidad ρ y del módulo de elasticidad E_d del material refractario. Por ejemplo, la velocidad V_p de una onda P a través de un sólido refractario elástico isótropo infinito, con composición homogénea, se puede determinar con la ecuación (3). Por el contrario, la ecuación (4) proporciona la

velocidad V_p de una onda P a través de estructuras refractarias en forma de varilla, donde el diámetro de la varilla es mucho más pequeño que la longitud (es decir $d \ll L$).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (3)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (4)$$

5

En las ecuaciones (3) y (4), ν es la proporción de Poisson, ρ es de nuevo la densidad y E_d es el módulo (dinámico) de elasticidad de Young para el material refractario.

10

La velocidad de una onda P a través de una estructura en forma de varilla, dada por la ecuación (4), será menor que la velocidad de la onda P a través de un sólido isotrópico infinito, dado por (3). En conjunto, las ecuaciones (3) y (4) definen puntos finales superiores e inferiores respectivos para un intervalo de velocidades de onda P en estructuras sólidas refractarias homogéneas que caen en alguna parte entre los extremos de un sólido infinito y una varilla muy delgada. Aunque ambas ecuaciones (3) y (4) relacionan la elasticidad de un material con la velocidad, ninguna toma en consideración la temperatura del material.

15

Algunas realizaciones de la invención proporcionan un factor de escalado de velocidad α que puede usarse para corregir la velocidad de una onda P en un material refractario en el que el módulo de elasticidad cambia debido al calentamiento extremo. En algunas realizaciones específicas, el factor de escalado de velocidad α se calcula como una función del cambio relativo en el módulo de elasticidad E_d sobre un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través de una capa de un tipo de material refractario. En consecuencia, las ecuaciones de velocidad (3) y (4) pueden reescribirse como ecuaciones corregidas (5) y (6), respectivamente.

20

$$V_p' = \alpha V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \alpha \quad (5)$$

$$V_p' = \alpha V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \alpha \quad (6)$$

En un ejemplo muy específico, si el cambio de elasticidad es lineal en un intervalo de temperatura continuo, el factor de escalado de velocidad α viene dado por la ecuación (7).

$$\alpha = 1 + \left(\frac{\int_{T_1}^{T_2} E(T) dT}{E_o} \right) = \left(1 + \frac{\Delta E_d}{E_o} \right) = \left(1 + \frac{E_{d2} - E_{d1}}{E_o} \right) \quad (7)$$

25

30

Los términos E_{d2} y E_{d1} corresponden a la elasticidad del material refractario a sus respectivas primera y segunda temperaturas (por ejemplo sobre una cara caliente y una cara más fría, respectivamente, de una capa de revestimiento refractaria), mientras que E_o corresponde a la elasticidad usada para calcular primero la velocidad V_p no corregida, que es probablemente el valor de temperatura ambiente de E_d disponible de los fabricantes de materiales refractarios.

35

Para muchos materiales refractarios, el cambio de elasticidad como una función de la temperatura es generalmente no lineal y no siempre se caracteriza fácilmente en una ecuación tan simple como la ecuación (7). En tales casos, se pueden usar técnicas avanzadas de ajuste de curvas para obtener números para la integral, mostrados en la ecuación (7), según se requiera para cada tipo de material refractario. En general, cada tipo de material refractario usado en una pared de horno tendrá un factor de escalado α de velocidad correspondiente. Además, muchos fabricantes no tienen datos precisos de elasticidad para materiales refractarios a altas temperaturas, ya que normalmente se supone que la elasticidad en tales materiales es relativamente constante. Por consiguiente, en muchos casos se deben realizar pruebas para determinar la elasticidad a temperaturas elevadas en el intervalo de las que se encuentran en los hornos metalúrgicos. Las pruebas implican calentar el material refractario y medir el módulo estático o dinámico de elasticidad.

40

Haciendo referencia a la figura 1, se muestra un dibujo en corte transversal de un horno 30 metalúrgico de ejemplo simplificado. El horno 30 metalúrgico incluye un armazón 31 de acero exterior, una primera capa de ladrillos 33 refractarios y una segunda capa de ladrillos 35 refractarios. Aquellos expertos en la técnica apreciarán que algunos hornos metalúrgicos también tienen un techo (no mostrado en la figura 1) que incluye un armazón de acero exterior y un revestimiento refractario interior o sólo una capa refractaria singular.

La primera capa de ladrillos 33 refractarios está más próxima al armazón 31 de acero y se considera una capa de seguridad. La segunda capa de ladrillos 35 refractarios, en contacto directo con el material 100 fundido, se considera una capa de trabajo. En un horno metalúrgico típico los ladrillos en una capa de seguridad son típicamente menos densos que los ladrillos en una capa de trabajo. Sin embargo, en algunos hornos puede ocurrir lo contrario o los ladrillos pueden ser del mismo tipo en cada capa. Adicionalmente y/o alternativamente, en algunos hornos, una capa de seguridad está compuesta de un material moldeable (por ejemplo una mezcla de arena, hormigón, alúmina y/u otros materiales), en contraste con los ladrillos como se describió anteriormente.

El espesor de cada una de la primera y segunda capas de ladrillos 33 y 35 refractarios depende parcialmente del procedimiento en el que interviene el horno metalúrgico. Generalmente, cuanto más agresivo sea el procedimiento, más gruesas serán las capas. Los espesores para revestimientos refractarios varían típicamente de 600 mm a 1600 mm.

Como se muestra sólo con fines ilustrativos, el material 100 fundido (por ejemplo, mineral de hierro fundido) está dentro del horno 30 metalúrgico y la primera y la segunda capas de ladrillos 33 y 35 refractarios se han deteriorado hasta cierto punto. En particular, la segunda capa de ladrillos 35 refractarios se deteriora significativamente y tiene una serie de defectos que incluyen almacenamientos 41, 43 y 45, una zona de eliminación de láminas 47 y un área 49 de desgaste extremo.

En el horno 30 metalúrgico en operación los almacenamientos 41, 43 y 45 están compuestas de impurezas que se han asentado fuera del material 100 fundido. La eliminación de láminas (por ejemplo eliminación de láminas 47) se produce cuando el material 100 fundido se filtra detrás de los ladrillos de una capa y separa esos ladrillos de la capa detrás. Los almacenamientos cerca del armazón 31 de acero pueden ser muy peligrosas, puesto que el armazón 31 de acero puede estar expuesto al material 100 fundido. Las áreas de desgaste extremo (por ejemplo, área 49) ocurren naturalmente a lo largo del tiempo a medida que los ladrillos de la capa de trabajo se desperdician.

El espesor total de una pared de horno en un punto es la combinación de las porciones restantes de capas de ladrillo refractario en ese punto además de cualquier acumulación sobre la capa de trabajo del revestimiento refractario en ese punto más el espesor del armazón exterior. Dado que el deterioro es difícil, si no imposible, para controlar y/o predecir el espesor del revestimiento refractario se espera que sea diferente en diferentes puntos. Sin embargo, en cada punto se puede usar el mismo método para evaluar el espesor del revestimiento refractario.

De acuerdo con un método específico proporcionado por una realización de la invención, se genera una onda P por un impacto aplicado al armazón de acero 31 del horno 30 metalúrgico. La onda P viaja a través del armazón 31 de acero y a través de las capas de ladrillo 33 y 35 refractario. Las reflexiones de la onda P se crean en las interfaces de material y más notablemente en la interfaz entre la segunda capa de ladrillos 35 refractarios y el material 100 fundido y las interfaces creadas por defectos (por ejemplo grietas, eliminación de láminas, burbujas y similares). Con el fin de evaluar con precisión las mediciones y las reflexiones de la onda P, se determina un factor de escalado de velocidad α para cada material refractario (por ejemplo, para cada capa de ladrillo refractario 33 y 35) incluido en el revestimiento refractario. Este método se describirá en mayor detalle a continuación con referencia a las Figuras 4 y 5.

Como se ha indicado anteriormente, el factor de escalado de velocidad α se calcula como una función del cambio relativo en el módulo de elasticidad sobre un gradiente de temperatura presente en una capa del material refractario. En algunos casos, el gradiente de temperatura incluye solamente una temperatura individual porque un material refractario particular se calienta uniformemente a la temperatura individual. Por otra parte, en otros ejemplos el gradiente de temperatura corresponde a un gradiente de temperatura específico esperado en otro tipo de material refractario. Las Figuras 2A y 2B ilustran gráficamente respectivos primer y segundo ejemplos de cómo la elasticidad en los materiales refractarios correspondientes en las capas 33 y 35 son dependientes de la temperatura.

Haciendo referencia a las Figuras 3 y 4, y con referencia adicional a las Figuras 1 y 2A-2B, se muestra un sistema para determinar la condición de un revestimiento refractario en un horno metalúrgico, según se proporciona mediante una realización muy específica de la invención. La Figura 3 incluye el horno metalúrgico 30 y todos los defectos y patrones de deterioro descritos anteriormente con referencia a la Figura 1. Por consiguiente, las Figuras 1 y 3 comparten indicaciones de referencia comunes para características idénticas comunes a ambas figuras.

El sistema ilustrado en las Figuras 3 y 4 es un sistema de Sensor Individual de Impacto Individual (SISS) porque incluye un sistema 70 de impacto individual y un sensor 72 individual. El sistema de impacto 70 y el sensor 72 se ubican adyacentes entre sí. El sistema también incluye un procesador 76 y un preamplificador 74 opcional (Preamplificador). Aquellos expertos en la técnica apreciarán que el sistema SISS también incluye una combinación adecuada de elementos estructurales asociados, sistemas mecánicos, hardware, firmware y software que se emplea

para apoyar la función y la operación del sistema SISS. Tales artículos pueden incluir, sin limitación, una fuente de alimentación, tubería, sensores de vibración, reguladores, sellos, aisladores y controladores electromecánicos.

En algunas realizaciones, el sensor 72 es un transductor de desplazamiento vertical de banda ancha o un dispositivo similar adecuado para funcionar como un sensor de onda de esfuerzo. Por ejemplo, en otras realizaciones, los acelerómetros y dispositivos similares son también adecuados para su uso como sensor 72.

En algunas realizaciones, tal como se ilustra en la Figura 3, el sensor 72 está acoplado para proporcionar una señal al procesador 76 a través del Preamplificador 74 opcional. En realizaciones alternativas, el sensor 72 está acoplado directamente al procesador 76. El Preamplificador 74 opera para amplificar las lecturas de sensor del sensor 72. Como se describe en detalle más adelante, el procesador 76 opera para evaluar lecturas de sensores recibidas desde el Preamplificador 74 (o directamente desde el sensor 72) para determinar la condición del revestimiento refractario bajo el sensor 72. Con referencia específica a la Figura 4, una medida del espesor total T_1 de la pared del horno bajo el sensor 72 es el espesor combinado del armazón 31 exterior de acero, de la primera y segunda capas de ladrillo 33 y 35 refractario, y la acumulación 45.

En algunas realizaciones, el procesador 76 incluye un medio de código de programa legible por ordenador incorporado en el mismo para determinar una condición de un revestimiento refractario. En algunas de tales realizaciones, los medios de código de programa legibles por ordenador incluyen instrucciones para activar el sistema 70 de impacto para generar una onda P y evaluar las reflexiones de la onda P.

El sistema 70 de impacto se usa para generar una onda P que se transmite en la pared del horno 30 metalúrgico golpeando primero un punto del armazón 31 de acero exterior. Es decir, el sistema 70 de impacto es un dispositivo adecuado para operar como un generador de onda de tensión. En algunas realizaciones, el sistema 70 de impacto es un sistema de impacto esférico. Los sistemas de impacto esféricos generan ondas P simples esféricas, fáciles de analizar en un amplio intervalo de frecuencias. En realizaciones alternativas, las ondas P pueden generarse manualmente con un mazo (o instrumento similar), con choques eléctricos controlados y/o pequeñas explosiones.

El intervalo de frecuencias de una onda P generada por el sistema de impacto puede controlarse ajustando al menos uno de varios parámetros, que incluyen, sin limitación, el diámetro del punto de contacto de un sistema de impacto esférico, la suavidad superficial del armazón 31 de acero exterior, la fuerza de entrada y el tiempo de contacto t_c . Por ejemplo, se generará una onda P con un intervalo de frecuencia relativamente alto si el armazón 31 exterior de acero es liso, limpio y golpeado con una fuente de impacto de diámetro relativamente pequeño. El componente de frecuencia útil más alto de una onda P generada puede estimarse a partir del tiempo de contacto t_c de acuerdo con la ecuación (8).

$$f_{\max} = \frac{1.25}{t_c} \quad (8)$$

El tiempo de contacto t_c es la duración del tiempo que el sistema 70 de impacto conecta con el armazón 31 de acero. El tiempo de contacto t_c se puede ajustar para controlar el intervalo generado de frecuencias en una onda P. Tener un intervalo relativamente amplio de frecuencias en una sola onda P es ventajoso ya que la energía de la onda en cada frecuencia se atenúa a diferentes grados como una función de los materiales a través de los cuales viaja la onda P.

Haciendo referencia específicamente a la Figura 4, un impacto produce la generación de una onda P 81 semiesférica por debajo del punto de impacto. Las ondas de superficie y las ondas S también se generan, sin embargo, más de la energía se transmite a través de la onda P 81 directamente alejada del sistema 70 de impacto. La onda P 81 se propaga alejándose del sistema 70 de impacto hasta encontrar interfaces acústicas (límites) o se desvanece debido a la atenuación a través del horno.

En general, cuando una onda P encuentra una interfaz acústica, dependiendo de las propiedades del material de la interfaz acústica, ya sea toda la onda o parte de la onda se refleja hacia la fuente del impacto. Si un segundo material tiene una impedancia acústica significativa menos que un primer material del que se origina una onda P (por ejemplo, refractario a gas o refractario a interfaces líquidos), entonces una porción significativa de la onda P se refleja de nuevo en la dirección desde la que se inició. Dicha interfaz se denomina interfaz libre de tensiones. Por otro lado, si el segundo material tiene impedancia acústica significativamente mayor que el primer material, parte de la onda P se refleja hacia atrás y otra parte continúa propagándose en el segundo material. Una pequeña porción de la propagación de la onda P en el segundo material se refracta a lo largo de la interfaz y otra pequeña porción de la propagación de la onda P se convierte en formas de onda (por ejemplo, ondas superficiales y ondas S). Las reflexiones rebotan hacia adelante y hacia atrás entre las interfaces acústicas, naturalmente atenuadas a medida que viajan a través de un material, hasta que la energía se desvanece más o menos completamente. Si los dos materiales tienen impedancias acústicas similares, la cantidad de reflexión es pequeña y la atenuación natural de los

materiales tiende a desvanecer la reflexión de la existencia antes de que la reflexión alcance el punto de impacto/sensor original.

Cada interfaz entre capas adyacentes (por ejemplo, entre las capas 35 y 45 de la figura 4) puede considerarse una interfaz acústica respectiva, ya que cada capa tiene probablemente una impedancia acústica que es diferente de las de las capas adyacentes a la misma. A pesar de esto, las reflexiones de las interfaces entre capas refractarias (por ejemplo 33 y 35) no tienden a producir reflexiones significativas a menos que estén presentes defectos. Cuando la onda P 81 propagadora encuentra una interfaz acústica, pasa por reflexión, refracción, difracción y conversión de modo. En muchas realizaciones de la invención no se da consideración significativa a los efectos derivados de la refracción, difracción y conversión de modo, mientras que las reflexiones se consideran en mayor detalle.

El sensor 72 está dispuesto para detectar reflejos, indicados, por ejemplo, mediante una única reflexión 83 de onda P semiesférica en la Figura 4, cuando llegan de nuevo a la fuente de impacto. Las llegadas de reflexión son casi periódicas y se relacionan con la velocidad de la onda P 81 en el revestimiento refractario y la longitud total de la trayectoria de la onda P 81 (y reflexión 83), que es el doble del espesor total T_t de la pared del horno. Además, la duración entre dos llegadas de reflexión sucesivas es una estimación de cuánto tiempo la onda P 81 y una reflexión 83 correspondiente tomaron para viajar a través de una capa correspondiente en la pared del horno. Con el fin de simplificar el modelo, el factor de escalado de velocidad α para cada capa de material refractario sólo se aplica a la velocidad no corregida V_p de la onda P 81 en ese material refractario particular. Por consiguiente, la ecuación (9) proporciona una estimación de un tiempo durante el cual una onda P viaja en una capa refractaria n.

$$t_{pn} = \frac{2T_n}{V_{pn}} \quad (9)$$

El término T_n es el espesor de una capa refractaria particular n, V_{pn} es la velocidad no corregida, y t_{pn} es una duración específica de tiempo entre las llegadas de reflexión. El tiempo t_{pn} puede considerarse como el período entre reflexiones 83. Dado que el recíproco de un período es una frecuencia correspondiente, la ecuación (9) puede escribirse en términos de frecuencia de reflexiones como se muestra en la ecuación (10).

$$f_{pn} = \frac{V_{pn}}{2T_n} \quad (10)$$

Las reflexiones 83, tomadas colectivamente, forman una respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio del tiempo de la pared del horno a la onda P 81 generada por el sistema 70 de impacto. La respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio del tiempo puede convertirse en una respuesta eco acústica-ultrasónica de dominio de frecuencia correspondiente que usa un método de Transformación de Fourier Rápido (FFT) u otra técnica de procesamiento de señalización digital (y probablemente menos eficiente) por el procesador 76. En algunas realizaciones, el procesador 76 tiene acceso a un medio legible por ordenador que tiene instrucciones para llevar a cabo un método FFT u otro método de procesamiento de señal digital para convertir entre los dominios de tiempo y frecuencia. La respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio de frecuencia muestra el efecto que las sucesivas reflexiones de llegada tienen sobre la superficie del armazón 31 de acero exterior.

Sin embargo, antes de que se puedan usar las ecuaciones (9) y (10), de acuerdo con una realización muy específica de la invención, la velocidad V_p de la onda P 81 y la reflexión 83 correspondiente en cada material refractario se corrigen aplicando el factor de velocidad de escalado α_n anteriormente mencionado, para cada material refractario correspondiente n.

La velocidad de onda generada por la fuente de impacto es una medida indirecta de la velocidad de la onda P. Esta velocidad de onda es una velocidad de onda aparente. Una fuente de impacto causa múltiples reflexiones de las ondas P que causan la excitación de un modo particular de vibración. Este modo de vibración se denomina modo de espesor de vibración y resulta en expansiones y contracciones alternas a través del espesor del objeto. Para determinar el primer modo de vibración generado por un sistema de impacto se usaron numerosas pruebas de elementos finitos y de laboratorio, que cubrían un amplio rango de formas y dimensiones para los sólidos. Este primer modo de vibración o frecuencia fundamental afecta a la velocidad de la onda P y se denomina β . Es decir, también se puede aplicar opcionalmente un segundo factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría β_n para cada material refractario n con el fin de mejorar la precisión del espesor y/o las mediciones de identificación de defectos obtenidas. La forma y las dimensiones de un ladrillo refractario tienen un efecto sobre la velocidad V_p de una onda P a través del ladrillo refractario. Con el fin de corregir estos efectos dependientes de la geometría, se puede determinar un segundo factor de escalado de velocidad β como una función de la proporción dimensional relativa de un ladrillo refractario típico dentro de cada una de las capas de ladrillo 33 y 35 refractario.

En una realización específica, β es 0.96 para proporciones de longitud a anchura de 2.0 y varía entre 0.90 y 0.96 para proporciones de longitud a anchura entre 1.0 y 2.0. Los valores exactos para β se pueden determinar en ladrillos a temperatura ambiente. Si una capa refractaria incluye ladrillos de formas diferentes, entonces cada forma debe ser considerada.

- 5 En algunas realizaciones, el procesador tiene acceso a un medio legible por ordenador que tiene instrucciones para determinar las velocidades no corregidas y los factores de escalado para cada material refractario. En una realización específica, el espesor de un revestimiento refractario que incluye sólo un tipo de material refractario (es decir, una capa refractaria) se puede calcular de acuerdo con la ecuación (11) como sigue.

$$T = \frac{\alpha\beta V_p}{2f_p} \quad (11)$$

- 10 Alternativamente, si el revestimiento refractario incluye múltiples capas de diferentes materiales refractarios (como se muestra en la Figura 4), la ecuación de espesor se vuelve más compleja y es más fácil de resolver en el dominio de frecuencia. Puesto que cada capa refractaria contiene ladrillos de diferente composición y espesor, la velocidad de la onda P a través de cada capa puede ahora ser tomada en consideración en la evaluación global de la pared del horno. Posteriormente, la ecuación (11) se cambia y toma la forma de la ecuación (12).

$$f_i = \frac{1}{\frac{2T_1}{\alpha_1\beta_1V_{p1}} + \frac{2T_2}{\alpha_2\beta_2V_{p2}} + \frac{2T_3}{\alpha_3\beta_3V_{p3}} + \dots} \quad (12)$$

- 15 Donde f_i es la frecuencia del espesor de la onda P de las capas refractarias, V_{p1} es la velocidad de la onda P en el material de la capa 1, T_1 es el espesor de la capa 1, V_{p2} es la velocidad de la onda P en el material de la capa 2, T_2 es el espesor de la capa 2, y así sucesivamente.

- 20 Haciendo referencia a la Figura 5, y con referencia continua a la Figura 4, se proporciona un diagrama de flujo que ilustra un método de ejemplo muy específico de acuerdo con una realización de la invención. Un número de pasos en la Figura 5 se asignan colectivamente a un prefijo "B" porque se han proporcionado estos pasos particulares para describir ilustrativamente, en pasos discretos simplificados, lo que está sucediendo a una onda P mientras se desplaza a través de una pared de horno. Estos pasos generalmente no se pueden controlar después de que se cree la onda P. Los expertos en la técnica apreciarán que una secuencia real de sucesos relacionados con una onda P propagadora es algo más compleja.

- 25 En el paso 5-1, el sistema 70 de impacto se activa para generar la onda P 81 en la superficie exterior del armazón 31 de acero exterior. Por consiguiente, en el paso B5-2, la onda P 81 se propaga a través del armazón 31 de acero exterior. En el paso B5-3, la onda P alcanza una interfaz acústica que puede ser representativa de la primera capa refractaria de ladrillos 33, el material 100 fundido o un defecto como se ha descrito anteriormente.

- 30 En el paso B5-4, si el material en la interfaz acústica es el material fundido (sin trayectoria, paso B5-4), entonces la mayor parte de la onda P 81 se refleja hacia atrás hacia el sensor 72. El resto se pierde en el material 100 fundido. Por otra parte, si el material en la interfaz acústica es un sólido (por ejemplo, la primera capa refractaria de ladrillos 33), entonces (camino de sí, paso B5-4) una porción de la onda P 81 continúa propagándose lejos del sistema 70 de impacto en el paso B5-6 y otra porción de la onda P 81 refleja hacia atrás hacia el sistema 70 de impacto en el paso B5-7. Después del paso B5-6, la onda P 81 continúa repitiéndose a través de los pasos B5-3, B5-4 y así sucesivamente hasta que la energía de la onda finalmente se desvanece por completo. Las reflexiones 83 producidas en los pasos B5-5 y B5-7 alcanzan eventualmente el armazón 31 de acero exterior, en el paso B5-8, después de reflexiones, refracciones, difracciones y conversiones de modo propias.

- 40 En el paso 5-9, el sensor 72 detecta las reflexiones 83 a medida que llegan a través del tiempo y el procesador 76 registra el tiempo de llegada y la magnitud de cada reflexión. Estos datos forman la respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio del tiempo de la pared del horno a la onda P 81. Después de que se han hecho las mediciones de reflexiones, el procesador 76 convierte la respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio del tiempo a una respuesta de eco acústica-ultrasónica de dominio de frecuencia en el paso 5-10. Se evalúa la respuesta de eco acústica-ultrasónica del dominio de frecuencia, como en las ecuaciones (9) y (12) para determinar la condición del revestimiento refractario, teniendo en cuenta las velocidades no corregidas y los factores de escalado descritos anteriormente, que se pueden calcular a priori.

- 45 En la Figura 6 se muestra una ilustración simplificada que muestra un sistema de inspección no destructivo y no invasivo de Sensor Múltiple de Impacto Único (SIMS) de acuerdo con otra realización. La SIMS mostrada en la Figura 6 es similar a la SISS mostrada en la Figura 3. La Figura 6 incluye también el horno 30 metalúrgico y todos los defectos y patrones de deterioro descritos anteriormente con referencia a la Figura 1. Por consiguiente, las Figuras 1, 3 y 6 comparten indicaciones de referencia comunes para características idénticas comunes para las tres figuras.

El sistema SIMS mostrado en la figura 6 incluye el sistema 70 de impacto como se describió para el sistema SISS de la Figura 3. Sin embargo, en lugar de un sensor individual y un Preamplificador individual opcional, el sistema SIMS incluye dos sensores 72a, y dos Preamplificadores 74a, b opcionales correspondientes. Es decir, los dos sensores 72a, b están acoplados opcionalmente al procesador 76 a través de los dos Preamplificadores 74a, b correspondientes, respectivamente. Los sensores 72a, b están colocados adyacentes al sistema 70 de impacto y, en operación, las mediciones obtenidas de los dos sensores 72a, b se promedian, correlacionan y/o se integran juntos. De nuevo, los factores de escalado de velocidad se emplean ventajosamente como se ha descrito anteriormente. Aquellos expertos en la técnica apreciarán que el procesador puede tener acceso a un medio de código de programa legible por ordenador que tiene instrucciones para combinar las mediciones de los dos sensores 72a, b.

En otra realización más, se proporciona un dibujo esquemático simplificado de un sistema de inspección no destructivo y no invasivo de Múltiples Sensores de Impacto Múltiple (MIMS) en la Figura 7 en combinación con un horno 32 metalúrgico. El MIMS, mostrado en la Figura 7, incluye un número de sensores, indicado por el ejemplo 73a, 73b, 73c y 74d, que están dispuestos alrededor de la superficie del horno 32 metalúrgico. El sistema MIMS también incluye un control de impacto y un conjunto 77 de Preamplificador de sensor y un procesador 78. Cada uno de los pares sensor-sistema de impacto está acoplado al procesador 78 a través del control del sistema de impacto y de del conjunto 77 de Preamplificador del sensor. Específicamente, como un ejemplo ilustrativo, el par 73d sensor-sistema de impacto está acoplado al control del sistema de impacto y al conjunto 77 del Preamplificador del sensor por una línea 61 I/O que se ramifica desde un bus 63 de I/O conectado al control del sistema de impacto y al conjunto 77 de Preamplificador del sensor.

En operación, los sistemas de impacto individuales pueden ser accionados uno a la vez, en grupos o todos juntos. Cada sistema de impacto puede estar dispuesto y activado para generar una onda P respectiva que tiene un intervalo específico de frecuencias que pueden o no ser diferentes de las ondas P generadas por otros sistemas de impacto incluidos en el sistema MIMS. Aquellos expertos en la técnica apreciarán que el control del sistema de impacto y el conjunto 77 del preamplificador de sensor y/o el procesador 78 puedan tener acceso a un medio de código legible por programa de ordenador que tiene instrucciones para combinar las mediciones

De forma similar, los sensores individuales pueden usarse para recolectar datos de onda P desde los sistemas de impacto con los que están emparejados y/o uno o más de los sistemas de impacto en el sistema MIMS. Por consiguiente, las mediciones de reflexión recolectadas de uno o más de los sensores pueden promediarse, correlacionarse y/o integrarse conjuntamente. De nuevo, los factores de escalado de velocidad se emplean ventajosamente como se ha descrito anteriormente. Aquellos expertos en la técnica apreciarán que el procesador 78 puede tener acceso a un medio de código legible por programa de ordenador que tiene instrucciones para combinar las mediciones.

Además de lo descrito anteriormente, las mejoras recientes de acuerdo con algunas realizaciones de la invención tienen en cuenta cambios relativos en el espesor de un revestimiento refractario y los cambios relativos en la densidad de algunos de los materiales refractarios en el revestimiento refractario.

Más específicamente, al considerar cambios relativos en el espesor del revestimiento refractario, la determinación inicial de α tal como se hizo de acuerdo con la ecuación (7) anterior puede actualizarse de acuerdo con la ecuación (13). La ecuación (13) usa una estimación del espesor restante del revestimiento refractario para establecer los valores límite del gradiente de temperatura a través del revestimiento refractario. Con referencia específica a la ecuación (13), los nuevos términos L_1 y L_2 son espesores límite respectivos del gradiente de temperatura correspondiente a la estimación del espesor restante del revestimiento refractario.

$$\alpha' = \frac{\left(\frac{1}{T_2 - T_1}\right) \left(\frac{1}{L_2 - L_1}\right) \iint E(T(L)) dL dT}{E_o} \quad (13)$$

En la evaluación de un horno operativo, se puede calcular de forma iterativa una estimación más precisa del espesor del revestimiento refractario empleando la ecuación (13) para actualizar el valor de α en cada iteración usando el valor más actualizado para el espesor del revestimiento refractario. Es decir, α se calcula iterativamente junto con las estimaciones iterativas del espesor del revestimiento refractario. En algunas realizaciones los cálculos iterativos continúan hasta que se alcanza un valor de retorno decreciente significativo. Por ejemplo, los cálculos iterativos se detienen cuando la diferencia en las mediciones de espesor es inferior al 2-5%. Un método de ejemplo muy específico para determinar la profundidad de defecto de un revestimiento refractario en un horno metalúrgico de acuerdo con aspectos de la invención se describe en detalle a continuación con referencia al diagrama de flujo mostrado en la Figura 8.

De forma similar, dado que la velocidad de una onda P también depende de la densidad de materiales en el revestimiento refractario, también pueden tenerse en cuenta cambios en la densidad durante la vida útil de un horno. Los datos empíricos muestran que la densidad varía ligeramente con la temperatura. Los cambios de densidad son típicamente una consecuencia de cambios de volumen resultantes de un aumento de temperatura en un horno en operación. Un cambio en la densidad es típicamente del orden de 1-2%. La densidad afecta en última instancia a la

velocidad de la onda como se muestra en las ecuaciones (3)-(6) proporcionadas anteriormente. Por consiguiente, se puede actualizar ya sea un factor de escalado (por ejemplo α) para tener en cuenta el cambio de densidad o ajustar la velocidad directamente como una función de la densidad.

5 Como se ha indicado anteriormente, la Figura 8 muestra un diagrama de flujo que representa los pasos de un método para determinar la profundidad de defecto en un revestimiento refractario de un horno metalúrgico de acuerdo con aspectos de la invención. A partir del paso 8-1, el método incluye caracterizar las propiedades del material refractario (en el revestimiento refractario) como una función de la temperatura. Este paso puede omitirse si las propiedades de los materiales refractarios se han caracterizado previamente o estuvieran disponibles por el fabricante de los materiales refractarios. Sin embargo, como se describió anteriormente, la velocidad de la onda y las propiedades de elasticidad de los materiales refractarios se consideraron generalmente como constantes y existe una probabilidad significativa de que las propiedades como una función de la temperatura no sean conocidas, incluso para el fabricante.

10 En el paso 8-2, el método incluye recopilar datos de frecuencia como se ha descrito anteriormente con referencia a las Figuras 3-7. En el paso 8-3, se estima un perfil de temperatura en el revestimiento refractario a partir de los datos de frecuencia que asume que el revestimiento refractario no se ha deteriorado (es decir se asume que el revestimiento refractario está en el espesor total original sin deterioro). Usando el perfil de temperatura y los datos de frecuencia estimados, se calcula un primer valor para el factor de escalado de velocidad α en el paso 8-4, de acuerdo con la ecuación (7) presentada anteriormente.

15 En el paso 8-5, el método incluye el uso de los datos de frecuencia y el valor del factor de escalado de velocidad α para determinar una estimación del espesor revisado para el revestimiento refractario, que corrige así el supuesto hecho en el paso 8-3. A su vez, en el paso 8-6 se calcula nuevamente un valor revisado del factor de escalado de velocidad α usando la ecuación (7). Los pasos 8-5 y 8-6 se repiten en secuencia hasta que se alcanza la convergencia, lo que significa que se ha alcanzado un punto de rendimientos decrecientes en términos de corrección de los valores del factor de escalado de velocidad α y de la estimación de espesor. Es decir, en el paso 8-7, una vez que se ha alcanzado la convergencia en los valores del factor de escalado de velocidad α y la estimación de espesor (el camino de "Y" o sí, paso 8-7), el método pasa al paso 8-8, en oposición a volver de nuevo al paso 8-5 (a lo largo del camino "N" o sin camino, paso 8-7).

20 En el paso 8-8 se usan frecuencias secundarias en los datos de frecuencia correspondientes a defectos y el valor para el factor de escalado de velocidad α para calcular la profundidad de defecto como se ha descrito anteriormente con respecto a las Figuras 3-7. A continuación, en el paso 8-9, se usa la profundidad de defecto para calcular un nuevo factor de escalado de velocidad α' de acuerdo con la ecuación (13), que incorpora de este modo las mediciones de espesor en la determinación de cálculos posteriores de la profundidad de defecto. Por consiguiente, a su vez, el cálculo de profundidad de defecto se revisa usando el nuevo factor de escalado de velocidad α' .

25 En cuanto a los pasos 8-5 y 8-6, los pasos 8-9 y 8-10 se repiten hasta que los valores para el nuevo factor de escalado de velocidad α' y la profundidad de defecto convergen a valores estables. Es decir, en el paso 8-11 una vez que se ha alcanzado la convergencia en los valores del factor de escala de velocidad α' y la estimación de la profundidad de defecto (el camino "Y" o sí, paso 8-11), el método continúa hasta el final, en oposición a volver de nuevo al paso 8-9 (a lo largo del camino "N" o ningún camino, paso 8-11).

30 Aunque la descripción anterior proporciona ejemplos de realización, se apreciará que la presente invención es susceptible de modificación y cambio sin apartarse del justo significado y alcance de las reivindicaciones adjuntas. Por consiguiente, lo que se ha descrito es meramente ilustrativo de la aplicación de aspectos de las realizaciones de la invención. Por lo tanto, debe entenderse que dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas, la invención se puede poner en práctica de otro modo que no se describe específicamente en la presente memoria.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para inspeccionar una pared de horno (31, 33, 35) metalúrgico que comprende:
una pluralidad de pares (73a-73d) de generador-sensor de onda de tensión accionados por impacto, cada par para generar una onda P y reflexiones de detección de la onda P en el punto en un horno metalúrgico;
5 caracterizado porque un procesador (78) comprende un código de programa que,
cuando se ejecuta por el procesador, causa que el procesador produzca una determinación de la condición de la pared de horno metalúrgico usando datos de dominio de tiempo recolectados por al menos un sensor, datos de dominio de frecuencia derivados de los datos de dominio de tiempo, y un factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura para corregir el cambio en la velocidad de la onda P y las reflexiones de la onda P a
10 través de un material (33, 35) refractario incluido en la pared metalúrgica del horno.
2. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que cada par de generador-sensor de onda de tensión accionado por impacto comprende un generador (70) de ondas de tensión accionado por impacto para generar la onda P que se propaga en la pared de horno metalúrgico y un sensor de onda de tensión (72) para detectar las reflexiones del P, y en el que el al menos un sensor para recopilar los datos del dominio de tiempo es el sensor de
15 onda de tensión.
3. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se calcula como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad sobre un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través del material refractario dentro de un horno metalúrgico en operación.
20 4. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico incluye la determinación del espesor de la pared del horno metalúrgico.
5. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico incluye la determinación del espesor de un revestimiento refractario en la pared del horno metalúrgico.
25 6. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico incluye la determinación la presencia o ausencia de defectos que incluyen eliminación de láminas, almacenamientos, grietas y burbujas
7. El aparato de acuerdo con la reivindicación 6, en el que la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico también incluye determinar la posición de defectos que incluyen eliminación de láminas, almacenamientos, grietas y burbujas.
30 8. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende además una pluralidad respectiva de preamplificadores (77) acoplados entre la pluralidad de pares de generadores-sensores de ondas de tensión accionados por impacto y el procesador.
9. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el procesador es causado además por el código de programa para usar un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría para producir la determinación
35 de la condición de la pared del horno metalúrgico.
10. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el sensor de ondas de tensión es uno de un transductor de desplazamiento vertical y un acelerómetro.
11. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el generador de ondas de tensión accionado por impacto tiene un punto de impacto esférico.
40 12. El aparato de acuerdo con la reivindicación 9, en el que el material refractario incluido en el horno metalúrgico se proporciona en forma de ladrillo, y el factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría se calcula como una función de las dimensiones relativas de los ladrillos refractarios.
13. El aparato de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la pared del horno metalúrgico incluye un revestimiento refractario que tiene una pluralidad de capas, cada una compuesta de un tipo de material refractario, y en el que el
45 procesador es causado además por el código de programa para producir una determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico que usa una pluralidad de factores de escalado de velocidad dependientes de la temperatura, cada factor de escala de velocidad dependiente de la temperatura que corresponde a un tipo de material refractario respectivo en el revestimiento refractario.
14. El aparato de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el factor de escalado de velocidad dependiente de la
50 temperatura se calcula también como una función de una estimación del espesor restante del revestimiento refractario, de manera que el espesor restante se usa para establecer los límites de un gradiente de temperatura a través del revestimiento refractario.

15. El aparato de acuerdo con la reivindicación 13, en el que cada una de las pluralidades de factores de escalado de velocidad dependientes de la temperatura se calcula como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad sobre un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través del material refractario correspondiente.
- 5 16. El aparato de acuerdo con la reivindicación 13, en el que el procesador es causado además por el código de programa para usar un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría para producir la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico.
17. El aparato de acuerdo con la reivindicación 16, en el que cada capa del revestimiento refractario incluye ladrillos refractarios de un tipo de material refractario y cada una de las pluralidades de factores de escalado de velocidad dependientes de la geometría se calcula como una función de las dimensiones relativas de los ladrillos refractarios en una respectiva capa.
- 10 18. El aparato de acuerdo con la reivindicación 14, en el que el cálculo del factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se procesa iterativamente teniendo en cuenta estimaciones actualizadas del espesor restante del revestimiento refractario hasta que se encuentre un rendimiento decreciente significativo.
- 15 19. El aparato de acuerdo con la reivindicación 18, en el que el procesamiento iterativo se detiene cuando se indica el rendimiento decreciente por un cambio de menos de 2% en la estimación del espesor restante del revestimiento refractario.
- 20 20. El aparato de acuerdo con la reivindicación 5, en el que uno de los factores de escalado de velocidad dependientes de la temperatura y velocidad de la onda P se ajustan para tener en cuenta un cambio relativo en la densidad de los materiales en el revestimiento refractario.
21. Un método para inspeccionar una pared de horno (31, 33, 35) metalúrgico que comprende:
introducir una onda P en una pared de horno metalúrgico en un punto; y
detectar una o más reflexiones de la onda P cerca del punto de introducción de la onda P en la pared del horno metalúrgico;
- 25 caracterizado por procesar las reflexiones en el dominio de tiempo y frecuencia en combinación con un factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura para corregir el cambio de velocidad de la onda P y las reflexiones de la onda P a través de un material (33, 35) refractario incluido en la pared metalúrgica del horno.
- 30 22. El método de acuerdo con la reivindicación 21, en el que el factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se calcula como una función de un cambio relativo en el módulo de elasticidad sobre un intervalo de temperatura correspondiente a un gradiente de temperatura a través del material refractario dentro de un horno metalúrgico en funcionamiento.
23. El método de acuerdo con la reivindicación 21 que comprende además determinar el espesor de la pared del horno metalúrgico.
- 35 24. El método de acuerdo con la reivindicación 21 que comprende además determinar el espesor de un revestimiento refractario en la pared del horno metalúrgico.
25. El método de acuerdo con la reivindicación 21 que comprende además determinar la presencia o ausencia de defectos que incluyen eliminación de láminas (47), almacenamientos (41, 43, 45), grietas y burbujas.
26. El método de acuerdo con la reivindicación 25 que comprende además determinar la posición de defectos presentes en la pared metalúrgica del horno.
- 40 27. El método de acuerdo con la reivindicación 21 que comprende además amplificar las reflexiones detectadas antes del procesamiento.
28. El método de acuerdo con la reivindicación 21 que comprende además incluir un factor de escalado de velocidad dependiente de la geometría para producir la determinación de la condición de la pared del horno metalúrgico.
- 45 29. El método de acuerdo con la reivindicación 22, en el que el factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se calcula también como una función de una estimación del espesor restante del revestimiento refractario, de tal manera que el espesor restante se usa para establecer los límites de un gradiente de temperatura a través del revestimiento refractario.
30. El método de acuerdo con la reivindicación 29, en el que el cálculo del factor de escalado de velocidad dependiente de la temperatura se procesa iterativamente teniendo en cuenta estimaciones actualizadas del espesor restante del revestimiento refractario hasta que se encuentre un rendimiento decreciente significativo.
- 50

31. El método de acuerdo con la reivindicación 30, en el que el procesamiento iterativo se detiene cuando el rendimiento decreciente está indicado por un cambio de menos de 2% en la estimación del espesor restante del revestimiento refractario.
- 5 32. El método de acuerdo con la reivindicación 24, en el que uno de los factores de escalado de velocidad dependientes de la temperatura y la velocidad de la onda P se ajusta para tener en cuenta un cambio relativo en la densidad de los materiales en el revestimiento refractario.

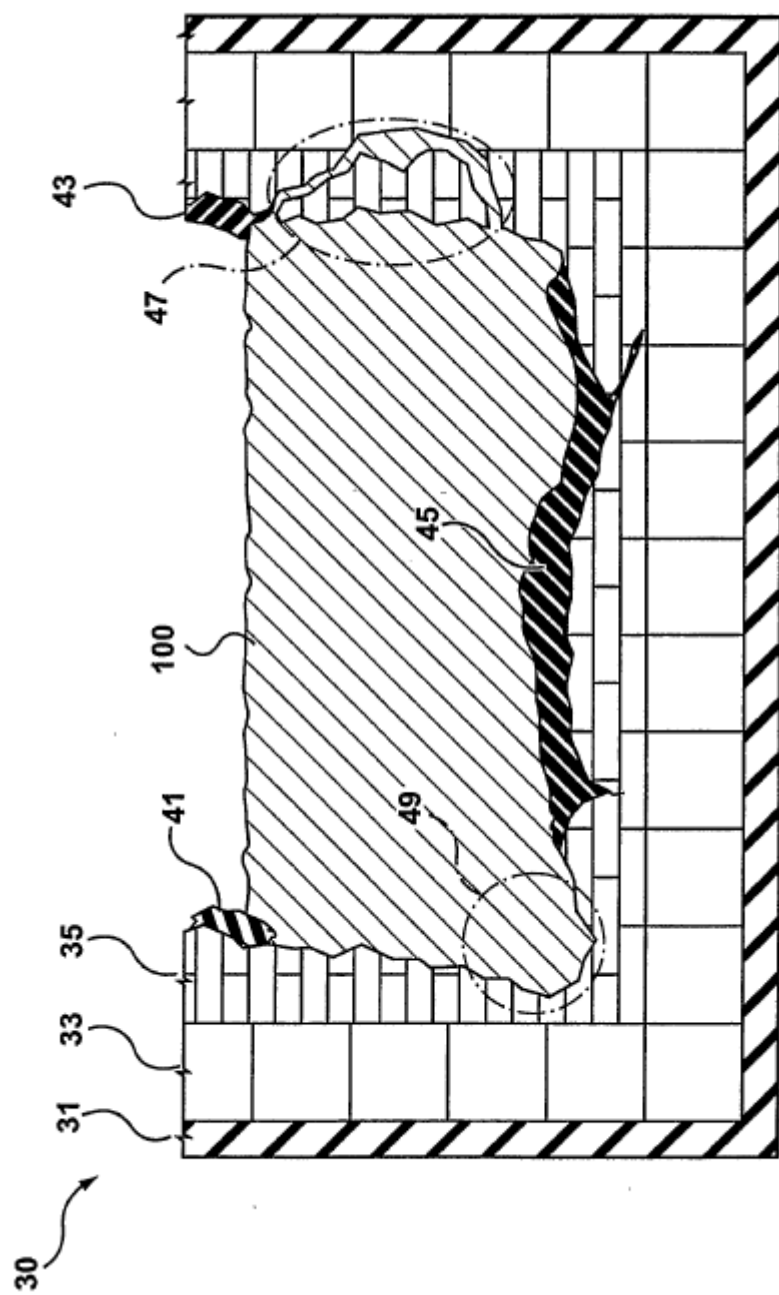


FIG. 1

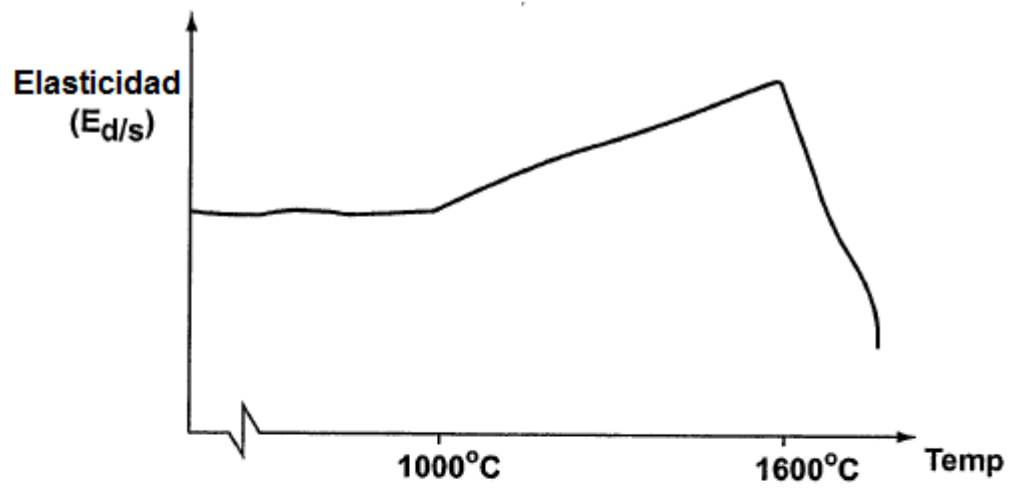


FIG. 2A

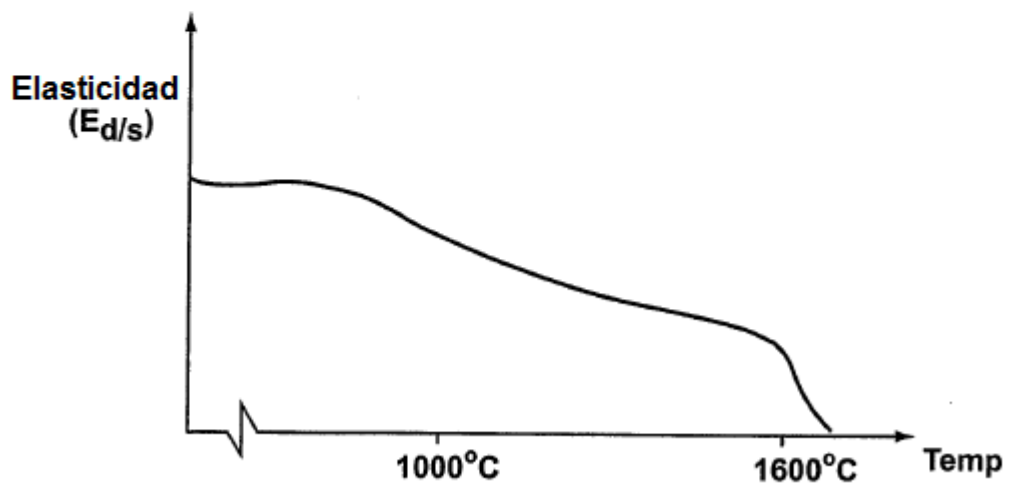


FIG. 2B

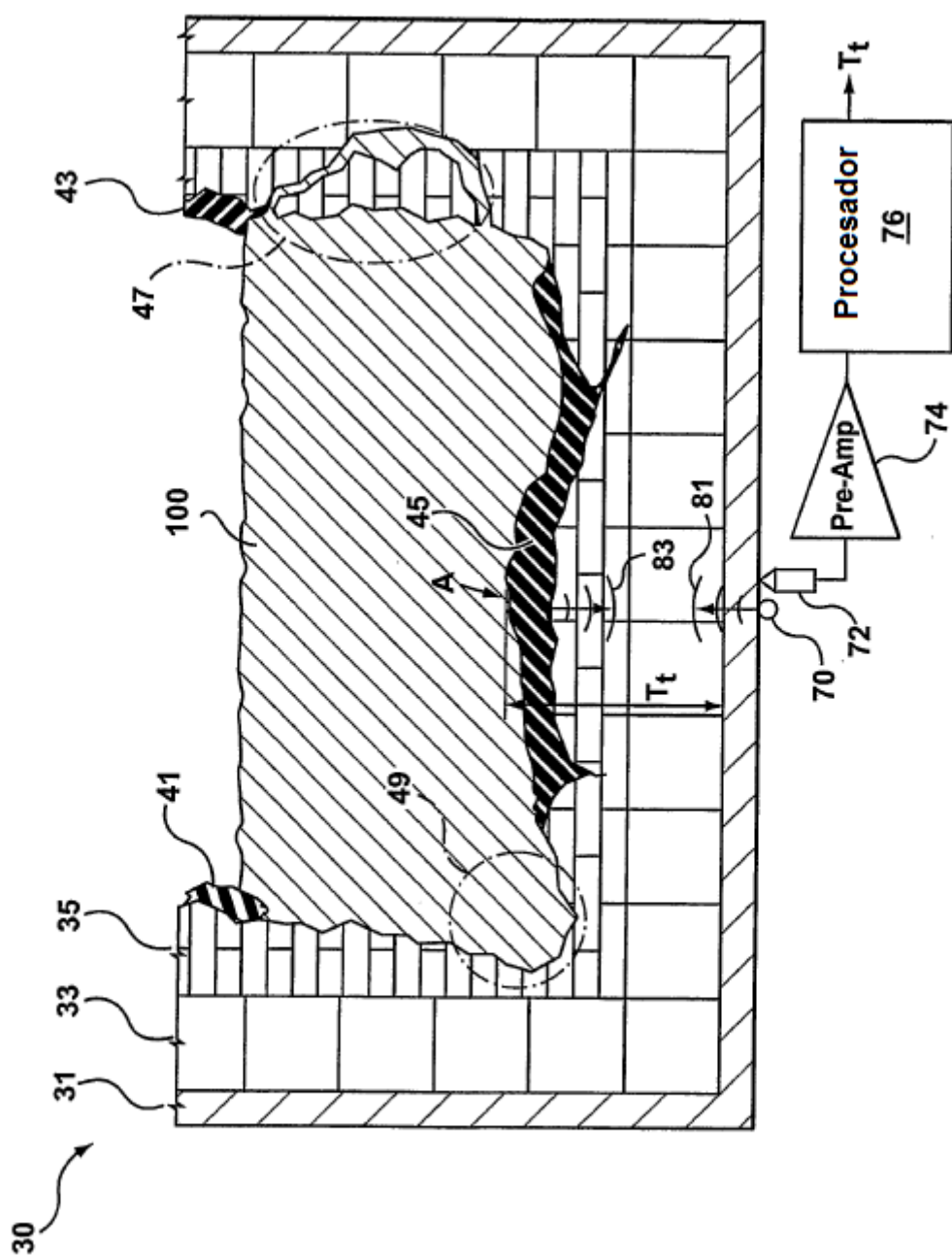


FIG. 3

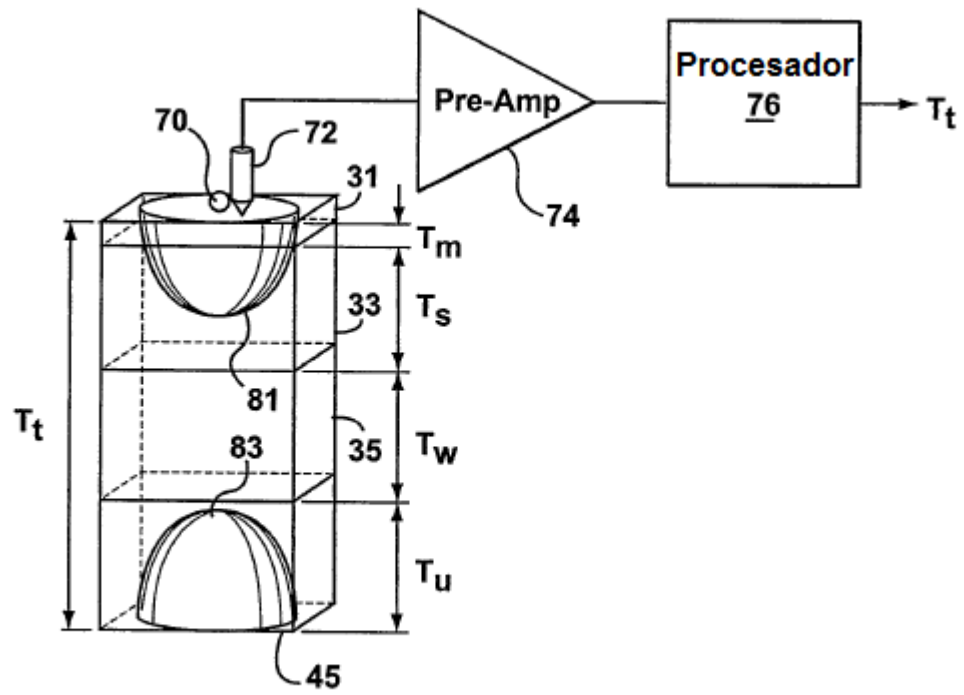


FIG. 4

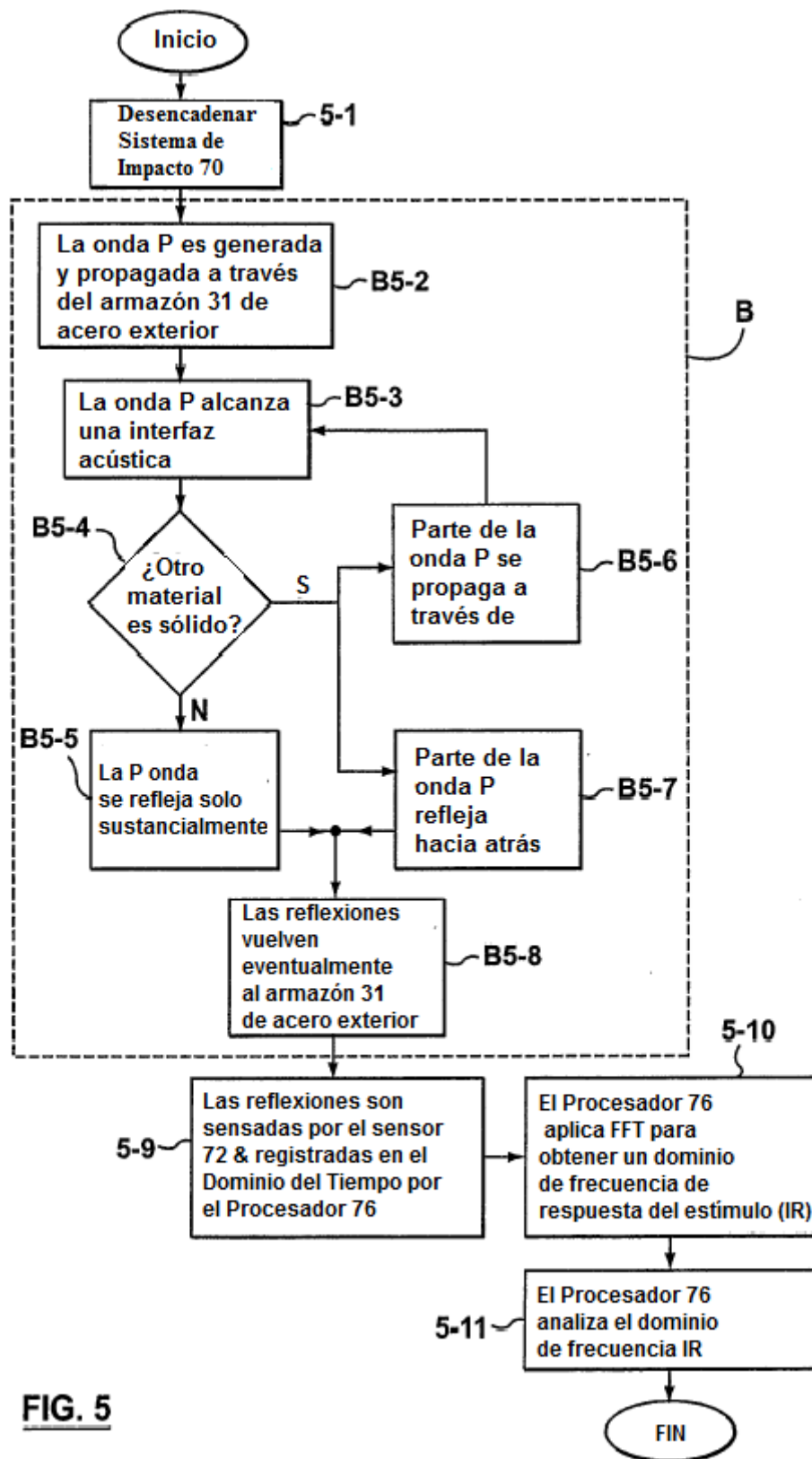
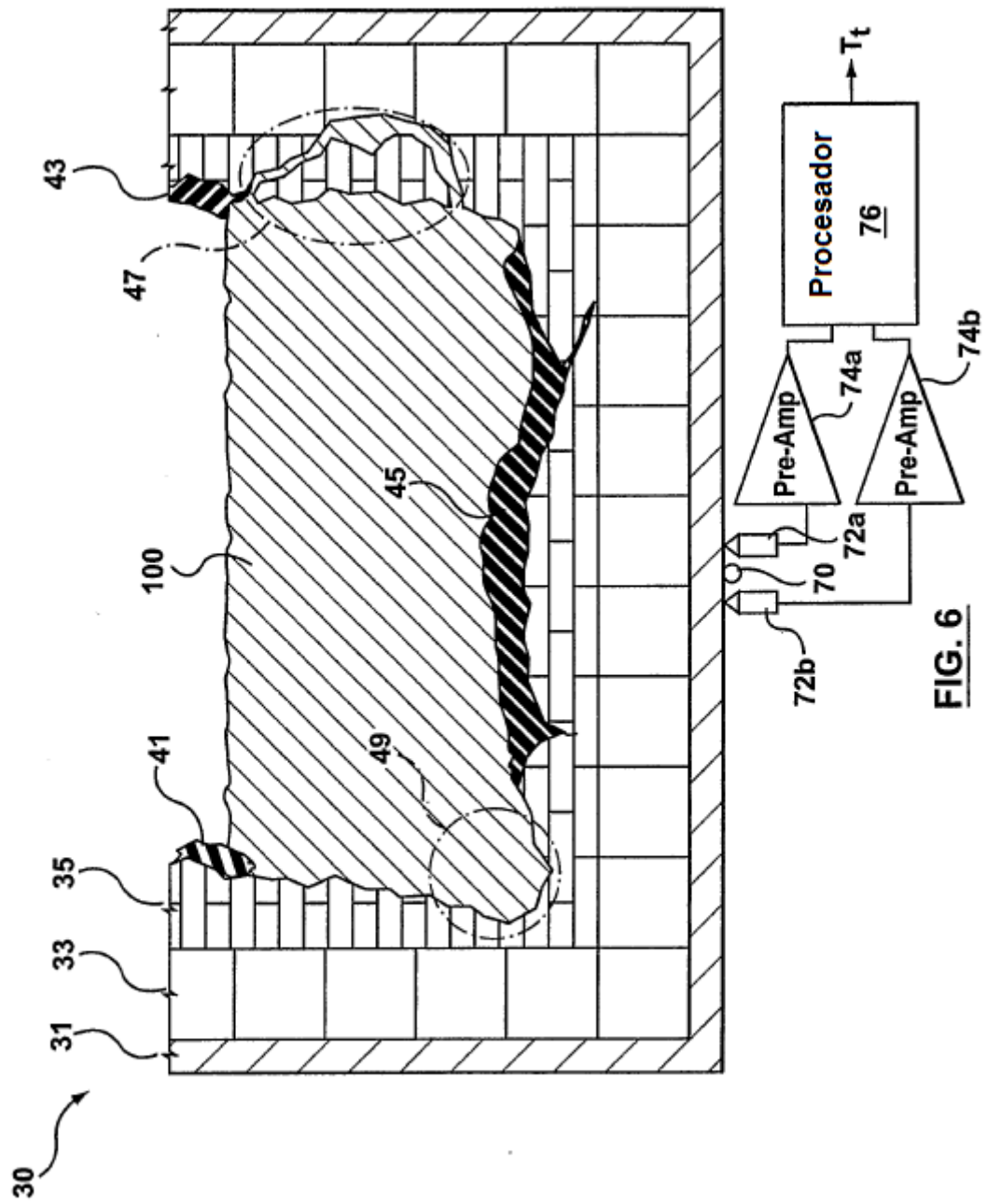


FIG. 5



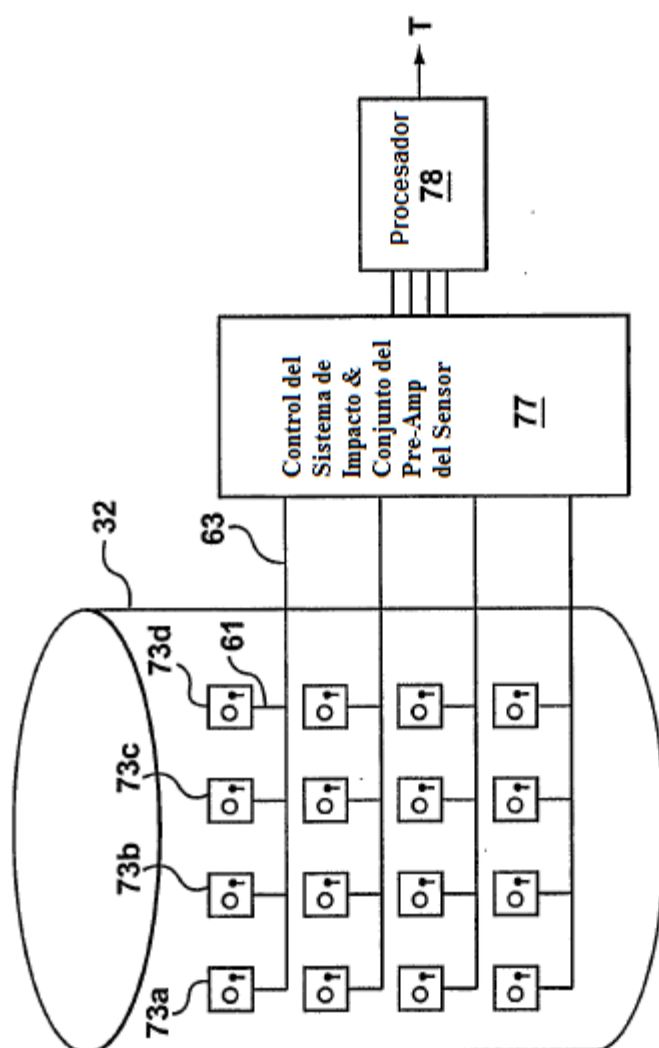


FIG. 7

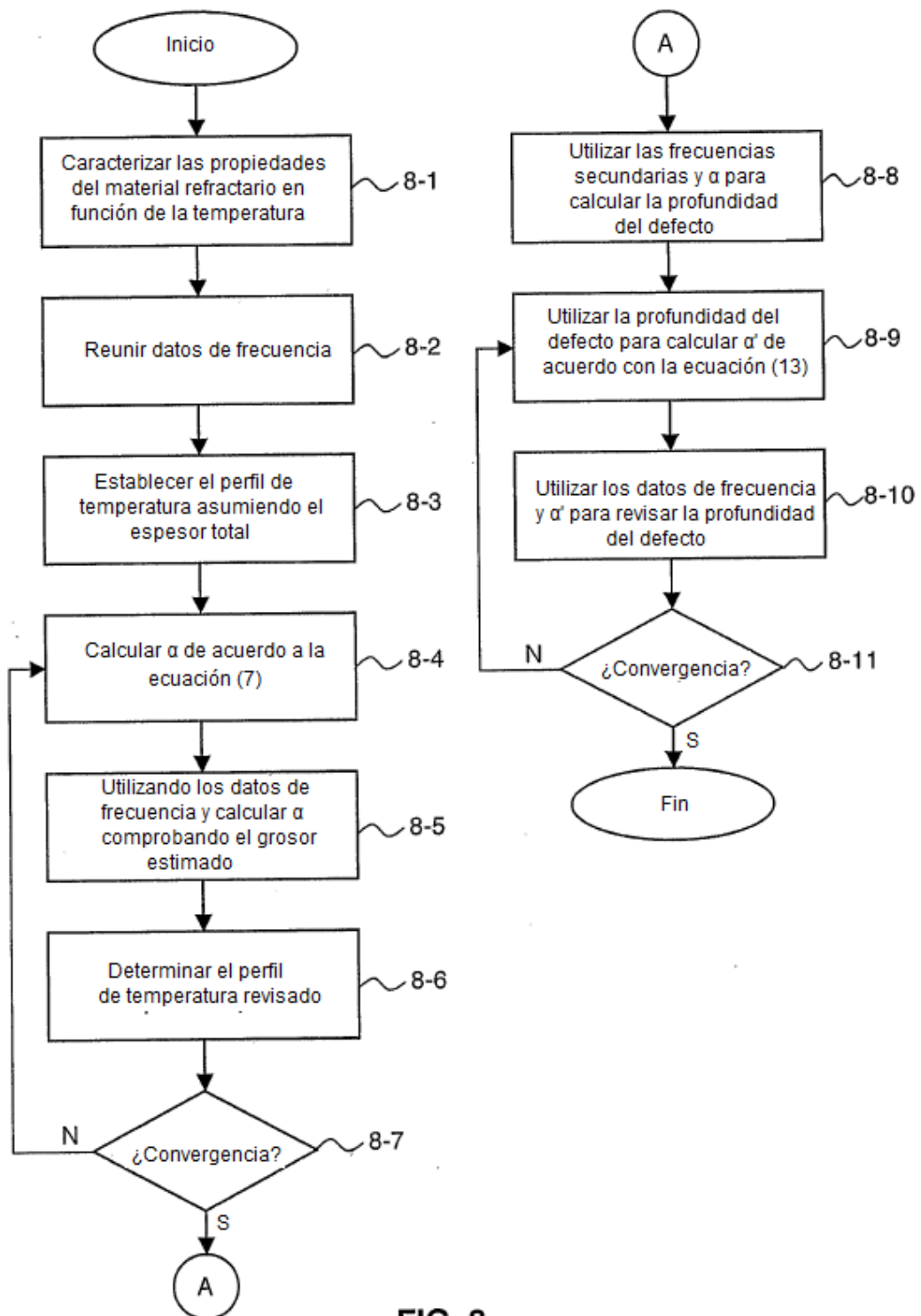


FIG. 8