

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 972 286**

51 Int. Cl.:

B22D 27/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.10.2013** **E 13190152 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.12.2023** **EP 2727669**

54 Título: **Método de fundición y uso de un aparato para fundición**

30 Prioridad:

06.11.2012 US 201261796265 P

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

12.06.2024

73 Titular/es:

**HOWMET CORPORATION (100.0%)
6450 Rockside Woods Boulevard S
Independence OH 44131, US**

72 Inventor/es:

NAIK, RAJEEV

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 972 286 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

Método de fundición y uso de un aparato para fundición

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a la fundición de un artículo, tal como un álabe de motor de turbina de gas u otro componente de turbina que tenga una sección transversal muy variable y/o una microestructura multiplexada a lo largo de su longitud, así como a un artículo fundido que tenga una microestructura equiaxial mejorada a lo largo de al menos parte de su longitud como resultado del control de la solidificación localizada.

Antecedentes de la invención

EP 1 321 208 A2 se refiere a un aparato de fundición de solidificación direccional capaz de aumentar un efecto de enfriamiento cuando el material fundido introducido en un molde se solidifica direccionalmente.

EP 1 531 020 A1 se refiere a un método de fundición de un artículo solidificado direccionalmente o monocristalino con un horno de fundición que comprende una cámara de calentamiento, una cámara de enfriamiento, un deflector de supuración entre ambas cámaras.

EP 0 749 790 A1 se refiere a otro método para fundir un artículo.

US-A 5 072 771 divulga un método de fundición de artículos de fundición equiaxial en donde la masa fundida se vierte en un molde mientras se calienta en un horno y posteriormente el molde que contiene la masa fundida se retira del horno mientras es enfriado por una placa de enfriamiento sobre la que descansa.

La producción de piezas fundidas equiaxiales sanas con una uniformidad de grano significativa mediante procesos convencionales de fundición a cera perdida requiere una atención considerable al diseño del sistema de colada, vaciadero y tubería de elevación, así como a los parámetros térmicos implicados. Esto conlleva complejos esquemas de colada para garantizar un suministro adecuado de metal en el molde, así como un sistema masivo de tubería de elevación para promover la solidificación hacia la tubería de elevación. Por lo tanto, la eficacia de inyección de las piezas fundidas equiaxialmente de forma convencional suele ser sólo del orden de 45 a 65 %, por lo que la menor eficacia del metal se traduce en costes de fabricación más elevados. Las piezas fundidas producidas mediante procesos convencionales también sufren de un elevado coste de soldadura y retrabajo asociado a la dificultad de alimentar la aleación fundida para formar piezas fundidas complejas para turbinas de gas con geometría variable. Las compuertas de colada y tuberías de elevación, que son parte integrante de la geometría de fundición en el proceso convencional, también se ven afectadas por el elevado coste de la retirada de las compuertas de colada y tuberías de elevación y los costes de acabado para devolver la pieza con acabado casi final. El modo principal de transferencia de calor en los procesos de fundición convencionales es principalmente por conducción pasiva y radiación desde el molde caliente a sus alrededores. Como resultado, la tasa de extracción de calor es limitada.

Breve descripción de la invención

La presente invención proporciona un método para fundir un artículo metálico con acabado casi final tal y como se define en la reivindicación independiente 1, en donde se proporcionan desarrollos adicionales del método inventivo en las sub-reivindicaciones, respectivamente. La presente invención se refiere además a un uso de un aparato para moldear un artículo tal como se define en la reivindicación independiente 13.

En particular, la presente invención proporciona un método para fundir un artículo metálico con acabado casi final, tal como un álabe de motor de turbina de gas u otro componente de turbina, en condiciones de solidificación de fundición que incorporan un enfriamiento por gas activo controlado para formar una microestructura de grano equiaxial progresivamente solidificada a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo.

El método inventivo consiste en proporcionar una masa fundida que comprende material metálico fundido en un molde calentado en un horno de calentamiento de moldes a una temperatura superior a una temperatura de solidificación del material metálico en donde el molde tiene una cavidad de molde con forma de artículo correspondiente a la del artículo que se va a fundir, mover relativamente el molde que contiene la masa fundida y el horno para retirar el molde que contiene la masa fundida del horno a través de zonas de enfriamiento activo en donde el gas refrigerante se dirige contra el exterior del molde para extraer activamente el calor de manera que se solidifique progresivamente la masa fundida allí con una microestructura de grano equiaxial a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo.

Una realización de la presente invención prevé ajustar al menos uno o al menos dos de los siguientes parámetros: la tasa de retirada del molde del horno, la tasa de flujo másico de gas refrigerante hacia la zona o zonas de enfriamiento activas y la temperatura del molde durante la retirada del molde del horno, en función de la sección o secciones transversales del artículo que alcancen una zona de enfriamiento activa [es decir, cuando el molde alcance una distancia de retirada próxima a la zona de enfriamiento activa], con el fin de solidificar progresivamente la masa fundida a lo largo de al menos una

parte de la longitud de la cavidad del molde del artículo con una microestructura de grano equiaxial. Otra realización ilustrativa particular de la presente divulgación prevé solidificar un componente de turbina de gas con acabado casi final con una microestructura que varía a lo largo de su longitud solidificando la masa fundida en la cavidad del molde en la zona de enfriamiento activa con una microestructura de grano columnar o monocristal a lo largo de al menos una parte de la longitud del componente, y ajustando al menos uno de la tasa de retirada del molde, la tasa de flujo másico del gas refrigerante y la temperatura del molde en función de que otra parte de la longitud del componente alcance la zona de enfriamiento activa para solidificar progresivamente la masa fundida con una microestructura de grano equiaxial a lo largo de esa parte de la longitud del componente.

En otra realización ilustrativa de la presente invención, el método consiste en introducir una masa fundida metálica en un molde que tiene una cavidad en forma de artículo con una sección transversal variable o uniforme a lo largo de su longitud correspondiente a la del artículo que se va a fundir. La temperatura del molde puede controlarse en un horno de calentamiento de moldes de manera que se mantenga por encima de la temperatura de solidificación, alternativamente, por encima de la temperatura de fusión, del material metálico hasta que el molde se enfríe progresiva y activamente a lo largo de al menos parte de su longitud en una o más zonas de enfriamiento activo. El molde que contiene la masa fundida y el horno se mueven relativamente para retirar el molde que contiene la masa fundida del horno a través de una zona de enfriamiento activa en donde el gas refrigerante se dirige contra el exterior del molde para extraer progresiva y activamente el calor a medida que el molde se desplaza a través de la zona de enfriamiento activa. De acuerdo con la presente invención, una o varias de las tasas de retirada del molde, la tasa de flujo másico de gas refrigerante en la zona o zonas de refrigeración activa y la temperatura del molde se ajustan durante la retirada del molde en función de las secciones transversales concretas del artículo que estén próximas a una zona de enfriamiento activa [es decir, cuando el molde alcance una distancia de retirada próxima a la zona de enfriamiento activa], con el fin de solidificar progresivamente la masa fundida a lo largo de al menos una parte de la longitud de la cavidad del molde del artículo con una microestructura de grano equiaxial.

Una realización ilustrativa particular de la presente invención extrae el molde que contiene la masa fundida primero a través de una zona de enfriamiento activa primaria y después a través de una o más zonas de enfriamiento activas adicionales (secundarias) que complementan la extracción de calor del molde. Cada una de las zonas de enfriamiento activo puede incluir una pluralidad de boquillas dispuestas alrededor de una trayectoria de retirada del molde que contiene la masa fundida del horno para dirigir chorros de gas refrigerante inerte u otro gas no reactivo hacia el molde.

En otra realización ilustrativa de la presente divulgación, el molde está provisto de una pared de molde relativamente delgada y conductora del calor que define la cavidad del molde del artículo para facilitar la extracción de calor en la(s) zona(s) de enfriamiento activo. La pared del molde puede estar formada por varias capas con diferentes coeficientes de dilatación térmica para establecer una fuerza de compresión en una capa más interna del molde cuando éste está caliente. Estos moldes contienen una estructura de capa exterior que tiene una expansión térmica menor que la estructura de capa interior para ayudar a producir moldes cerámicos de paredes más delgadas, que son más conductoras del calor.

En otra realización ilustrativa de la presente invención, antes de retirar el molde del horno, la temperatura de la masa fundida en el molde se controla para que sea sustancialmente uniforme a lo largo de la cavidad del molde. Alternativamente, en la práctica de la invención puede utilizarse un perfil de temperatura no uniforme de la masa fundida a lo largo de la longitud del molde, en función de la sección transversal concreta del artículo que vaya a fundirse.

La presente invención puede practicarse para producir un artículo fundido o solidificado que tenga una región de grano equiaxial en toda su longitud. La presente invención también puede practicarse para producir un artículo moldeado que tenga una región de grano equiaxial a lo largo de parte de su longitud y otra región de estructura de grano diferente, tal como grano columnar, monocristalino o estructura de grano equiaxial de tamaño diferente, a lo largo de otra longitud o de la longitud restante del artículo. Por ejemplo, la práctica de la presente invención puede proporcionar una pieza fundida de un componente de turbina, como un álabe de turbina o una aleta, que tenga una sección transversal variable a lo largo de su longitud, en la que la pieza fundida presente una microestructura de grano equiaxial solidificada progresivamente a lo largo de toda su longitud o de una parte de ella, en la que la microestructura de grano equiaxial carezca típicamente de granos de enfriamiento, granos columnares y esté sustancialmente desprovista (menos del 1 % de porosidad) de porosidad interna. Además, la microestructura de grano equiaxial suele presentar una segregación de fase microestructural sustancialmente reducida que permite someter la pieza fundida a un ciclo de tratamiento térmico de disolución a una temperatura más elevada sin incurrir en una fusión incipiente. El álabe o la pala de turbina fundida pueden fabricarse de acuerdo con otra realización para tener una microestructura de grano equiaxial a lo largo de la región de la raíz del álabe de turbina y una estructura de grano diferente, tal como grano columnar, monocristalino o granos equiaxiales de tamaño diferente, a lo largo de la región del perfil aerodinámico del álabe de turbina.

Además, la práctica de la presente invención es especialmente útil para moldear un artículo de grano equiaxial, tal como un álabe o pala de turbina, que tenga una microestructura de grano equiaxial a lo largo de al menos una parte de su longitud y una sección transversal variable del artículo que incluya al menos una región transversal [por ejemplo, la región de la raíz del álabe de turbina] que tenga al menos dos (2) veces, normalmente al menos cuatro (4) veces, el área de la sección transversal de otra región transversal (por ejemplo, la región del perfil aerodinámico del álabe de turbina) y en donde la sección transversal del artículo pueda variar continuamente a lo largo de su longitud. La práctica de la presente invención también puede ser útil para moldear un artículo de grano equiaxial que tenga una sección transversal

sustancialmente uniforme o constante a lo largo de su longitud.

Según otro aspecto de la presente divulgación, la distancia al molde y el tipo de boquillas se eligen para proporcionar la máxima extracción de calor del molde. De forma alternativa o adicional, las orientaciones vertical y horizontal de las boquillas pueden elegirse para proporcionar la máxima extracción de calor del molde. Además, la presión del gas refrigerante, el volumen del gas refrigerante o ambos pueden controlarse para proporcionar la máxima extracción de calor del molde.

En otra realización de la presente divulgación, el molde está provisto de una pared de molde relativamente delgada y conductora del calor que define la cavidad del molde del artículo para facilitar la extracción de calor en la zona de enfriamiento activa. En este sentido, "relativamente delgada" se refiere a una pared de molde que tiene de dos a tres capas menos de lodo y estuco que los moldes de revestimiento convencionales. Además, la pared del molde puede comprender múltiples capas cerámicas con diferentes coeficientes de expansión térmica, con material cerámico de menor expansión en el exterior para establecer una fuerza de compresión en una capa más interna del molde cuando éste está caliente.

De acuerdo con otro aspecto, el método inventivo incluye que antes de la retirada del molde del horno, la temperatura de la masa fundida en el molde se controla para que sea sustancialmente uniforme a lo largo de la cavidad del molde. Alternativamente, la temperatura de la masa fundida en el molde puede controlarse para que sea variable a lo largo de la cavidad del molde antes de la retirada del molde del horno.

En otra realización, el método incluye que se controlen la velocidad de extracción y la tasa de flujo másico de enfriamiento.

En otra realización de la presente invención (no reivindicada), el molde tiene un extremo cerrado apoyado en una placa enfriadora. El extremo cerrado del molde puede estar apoyado sobre un material aislante térmico en la placa enfriadora. Alternativamente, el molde puede tener un extremo abierto apoyado en la placa enfriadora.

El artículo a fundir tiene preferiblemente una sección transversal variable a lo largo de su longitud. Sin embargo, también es factible que el molde tenga una sección transversal sustancialmente uniforme a lo largo de su longitud. En una realización preferida, el artículo comprende un álabe de motor de turbina de gas o una pala, y la sección transversal del álabe o de la pala varía a lo largo de su longitud. En otra realización, el material metálico puede comprender una base de níquel, una base de cobalto, una superaleación de base de hierro o acero inoxidable.

Según otra realización, la microestructura de grano equiaxial a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo está desprovista de granos fríos y desprovista de granos columnares. Del mismo modo, la microestructura de grano equiaxial a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo puede estar desprovista de microporosidad interna y presentar una segregación sustancialmente reducida que permita que la pieza fundida se trate térmicamente por disolución a mayor temperatura sin incurrir en una fusión incipiente.

La presente divulgación se refiere además a un componente de turbina de fundición que tiene una microestructura de grano equiaxial progresivamente solidificada a lo largo de al menos una parte de su longitud, estando dicha microestructura de grano equiaxial desprovista de granos de enfriamiento y granos columnares a lo largo de su longitud. Preferiblemente, el componente de la turbina es un álabe o un molde de álabe. Más preferiblemente, la microestructura de grano equiaxial de la pieza fundida del componente de turbina carece de porosidad interna a lo largo de su longitud y presenta una segregación sustancialmente reducida que permite que la pieza fundida se trate térmicamente por disolución a mayor temperatura sin incurrir en una fusión incipiente.

De acuerdo con otra realización, la pieza fundida tiene una microestructura diferente a lo largo de otra parte de su longitud. En particular, la otra parte puede tener una microestructura que comprenda un grano columnar o una microestructura monocristalina. Las ventajas mencionadas de la presente divulgación e invención serán más evidentes para los expertos en la técnica a partir de la siguiente descripción detallada tomada con los siguientes dibujos.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es una vista en perspectiva de un álabe de motor de turbina de gas ejemplar que ilustra una sección transversal del álabe que varía considerablemente desde un extremo de la raíz hasta un extremo de la punta del álabe. La Figura 2 es una vista en perspectiva de un montaje de un modelo de cera compuesto por seis modelos individuales de álabes de turbina de cera conectados a una copa de vertido de cera por medio de su respectiva colada de cera. La Figura 3 es una vista en perspectiva del montaje del modelo de cera invertido en un molde de carcasa de cerámica representado por líneas punteadas alrededor del montaje del modelo. La Figura 3A es una vista en sección de una pared ejemplar de varias capas de un molde de envoltura para su uso en la práctica de la presente invención. La Figura 3B es una vista en sección de una pared multicapa convencional de un molde de envoltura que tiene un mayor grosor de pared de molde. La Figura 4 es una vista esquemática de un aparato de fundición equiaxial según una realización ilustrativa de la invención con múltiples (por ejemplo, tres) zonas de gas refrigerante activas alimentadas con gas refrigerante procedente de un colector común de suministro de gas refrigerante.

La Figura 5 es una vista esquemática de un aparato de fundición equiaxial según otra realización ilustrativa de la invención con una única zona de enfriamiento activa a la que se suministra gas refrigerante desde un colector de suministro de gas refrigerante.

La Figura 6 es una vista en perspectiva de una zona de enfriamiento activa ejemplar que comprende un colector anular de gas refrigerante que tiene una pluralidad de boquillas de descarga de gas refrigerante espaciadas alrededor del colector anular.

La Figura 6A es una vista parcial en perspectiva ampliada de la Figura 6.

La Figura 7A es una vista esquemática en sección parcial de un colector de gas refrigerante que tiene montados diferentes tipos (por ejemplo, ventilador, cono, niebla) de boquillas de descarga de gas refrigerante.

La Figura 7B es una vista esquemática en sección parcial de un colector de gas refrigerante que tiene montadas boquillas de descarga de gas refrigerante tipo ventilador con diferentes patrones de descarga de gas (por ejemplo, 30°, 50° y 65°).

La Figura 7C es una vista esquemática en sección parcial de un colector de gas de refrigeración que tiene montadas boquillas de descarga de gas con diferentes tipos de acción de impacto sobre la pared del molde, tal como impacto alto, intermedio y bajo, en función de la distancia boquilla-pared del molde y del diámetro del orificio.

La Figura 8 ilustra una orientación horizontal ejemplar de las boquillas de descarga de gas refrigerante en relación con el molde de carcasa que se retira de acuerdo con otra realización de la invención.

La Figura 9 ilustra a 1X la microestructura de grano equiaxial producida de acuerdo con la presente invención, mientras que la Figura 10 ilustra a 1X la microestructura de grano equiaxial producida por fundición equiaxial convencional.

Las Figuras 11A, 11B y 11C ilustran a 50X de aumento las respectivas microestructuras de grano equiaxial producidas por el proceso MX de bajo sobrecalentamiento, por la práctica de la presente invención y por la fundición equiaxial convencional.

La Figura 12 es un gráfico que ilustra esquemáticamente la porosidad de fundición ejemplar frente a la tasa de solidificación producida por la fundición equiaxial convencional, por la práctica de la presente invención y por el proceso MX.

La Figura 13A ilustra con el aumento indicado por la barra de escala de 10 mil (= 0,254 mm) la porosidad dendrítica y situada producida por la fundición equiaxial convencional. La Figura 13C ilustra a 25X de aumento la microporosidad dispersa producida por el proceso MX. La Figura 13B ilustra al aumento mostrado por la barra de escala de 30 mil (= 0,762 mm) la falta de microporosidad asociada a la práctica de la presente invención.

La Figura 14 es una fotografía de una aleta de motor de turbina de gas de grano equiaxial fabricado conforme a un Ejemplo ilustrativo descrito a continuación.

La Figura 14A es un gráfico que ilustra la variación de la tasa de retirada del molde y de la tasa de flujo másico de gas refrigerante con una temperatura del molde casi constante, con el fin de controlar la solidificación para producir la estructura de grano equiaxial para la aleta de turbina de gas de la Figura 14.

La Figura 15 es una vista en alzado esquemática de un artículo fundido que tiene una microestructura dual que comprende una región de grano equiaxial en un extremo (por ejemplo, una región de raíz) y una región de grano columnar o monocristal en otro extremo (por ejemplo, una región aerodinámica).

La Figura 15A es un gráfico que ilustra la variación de la velocidad de retirada del molde, de la tasa de flujo de gas refrigerante y de la temperatura del molde con el fin de controlar la solidificación para producir la microestructura dual del artículo moldeado de la Figura 15.

Descripción detallada de la invención

La presente invención es especialmente útil para, aunque no se limita a, la fabricación de artículos metálicos de grano equiaxial, tales como álabes de turbina, palas, aletas, boquillas y otros componentes, en donde el artículo tiene una sección transversal (tomada perpendicularmente al eje longitudinal del artículo) que varía significativamente a lo largo de la longitud del artículo, aunque la invención también puede utilizarse en la fabricación de artículos con una sección transversal sustancialmente uniforme o constante a lo largo de su longitud. La variación de la sección transversal del artículo a vaciar puede dar lugar a una gran variación de la masa a lo largo de la longitud del artículo y/o también puede deberse a una variación de la geometría que dé lugar simplemente a un gran cambio dimensional con poco cambio de masa (por ejemplo, un voladizo o plataforma de álabes de turbina ampliada con poco cambio de masa) a lo largo de la longitud del artículo. La presente invención también es útil para, aunque no se limita a, la fabricación de artículos metálicos de microestructura múltiple, tales como álabes de turbina, palas, aletas, boquillas y otros componentes, en donde el artículo tiene una microestructura de grano equiaxial a lo largo de parte de su longitud y otra microestructura, tal como una microestructura de grano columnar o monocristal, a lo largo de otra parte de su longitud. En la práctica de la invención, además de la refrigeración pasiva por conducción y radiación, se aplica una refrigeración activa por convección para extraer una cantidad sustancialmente mayor de calor del molde caliente y de la fundición para mantener una velocidad de solidificación sustancialmente constante a pesar de la variación del contenido de calor debida a la variación de las secciones transversales del metal fundido y las secciones transversales del molde.

A efectos ilustrativos y no limitativos de una realización particular, la presente invención es útil para fabricar una pieza fundida de grano equiaxial que incluya al menos una región de sección transversal que tenga un área de sección transversal sustancialmente mayor [por ejemplo, al menos dos (2) veces] que otra región de sección transversal y en donde la sección transversal del artículo pueda variar continuamente a lo largo de su longitud. Un ejemplo de moldeado de grano equiaxial de este tipo comprende un álabe de motor de turbina de gas industrial o aeronáutica, Figura 1, que tiene una región de raíz agrandada R, una región de plataforma agrandada P, una región de perfil aerodinámico F y una punta de álabe T, que puede estar agrandada o no con respecto a la sección transversal del perfil aerodinámico. Otros

componentes de turbinas de gas, tales como palas, aletas, segmentos de compresores, boquillas y otros componentes que también tengan una sección transversal muy variable o sustancialmente uniforme pueden fabricarse de acuerdo con la presente invención. Tales álabes, paletas, cucharas, boquillas y otros componentes de las turbinas de gas se fabrican normalmente con superaleaciones conocidas de base de níquel, base de cobalto o base de hierro, como GTD 111, IN 738, MarM 247, U500, y Rene 108, aunque la presente invención puede practicarse para fundir una gran variedad de metales y aleaciones (en lo sucesivo, materiales metálicos). Por ejemplo, también pueden fundirse aleaciones para boquillas a base de Co y aleaciones de acero inoxidable para ferretería.

A título ilustrativo y no limitativo, la presente invención se describirá en relación con la fundición de un álabe de motor de turbina de gas de superaleación de grano equiaxial y con acabado casi final, en donde "con acabado casi final" se refiere a una fundición que tiene superficies contorneadas en bruto para mejorar el flujo de aire y la transferencia de calor cuando no se permite el mecanizado posterior a la fundición. El álabe de fundición de grano equiaxial y con acabado casi final se fabrica en condiciones de fundición controladas que incluyen un enfriamiento activo controlado para formar una microestructura de grano equiaxial solidificada progresivamente a lo largo de toda o parte de la longitud del álabe. La microestructura de grano equiaxial fundido carece preferiblemente de granos de enfriamiento (granos muy finos en la superficie de fundición), granos columnares (granos alargados) y porosidad interna a lo largo de la longitud del álabe fundido, aunque una realización alternativa de la invención prevé la presencia localizada de granos columnares en una región fuera del diseño del álabe fundido, cuya región final de granos columnares puede eliminarse (cortarse) del álabe para ajustarla a las especificaciones de la pieza. Además, otra realización alternativa de la invención prevé un componente de motor de turbina de microestructura dual (por ejemplo, pala o álabe) en donde la microestructura de grano equiaxial producida mediante la práctica de la invención está presente a lo largo de una parte de su longitud mientras que otra microestructura, como el grano columnar, el monocristal o el grano equiaxial de tamaño diferente, se proporciona intencionadamente a lo largo de otra parte o de la parte restante de su longitud. Por ejemplo, la pieza fundida del álabe de la turbina puede solidificarse para tener una microestructura de grano equiaxial a lo largo de su región de la raíz y una microestructura de grano columnar, monocristalina o equiaxial de tamaño diferente a lo largo de su región del perfil aerodinámico.

El método y el aparato implican la fundición de un artículo metálico con acabado casi final, tal como un componente de motor de turbina de gas (por ejemplo, pala, álabe, aleta, boquilla, etc.) en condiciones de fundición que incorporan un enfriamiento activo controlado para formar una microestructura de grano equiaxial solidificada progresivamente a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo. Los parámetros de enfriamiento activo controlados se aplican en respuesta a la carga térmica colectiva del molde que se va a fundir, que incluye la composición del metal o la aleación, la cantidad de metal o aleación y la temperatura del material metálico fundido, así como la temperatura y la masa del molde.

Con el fin de fundir un álabe de motor de turbina de gas de grano equiaxial y acabado casi final, la presente divulgación proporciona un molde de fundición que tiene una cavidad de molde en forma de artículo cuya sección transversal varía a lo largo de su longitud correspondiente a la del álabe que se va a fundir. Para la fabricación de un álabe de turbina de gas, el molde comprende típicamente un molde de carcasa a cera perdida hecho mediante revestimiento de un montaje de modelo fugitivo, tal como un montaje de modelo de cera, en múltiples capas de limo cerámico y partículas cerámicas, como es bien sabido. Una vez formado el molde de carcasa sobre el montaje del modelo, éste se retira selectivamente mediante autoclave de vapor y/u otra técnica de calentamiento para fundir el material del modelo, disolución química u otra técnica bien conocida para dejar un molde de carcasa de cerámica sin cocer que tenga la cavidad del molde con acabado casi final deseada del álabe que se va a colar. A continuación, el molde de carcasa se cuece para desarrollar la resistencia adecuada del molde para la fundición. El proceso de retirada del modelo puede preceder como un paso separado o formar parte del tratamiento térmico (cocción) del molde.

A título ilustrativo y no limitativo, la Figura 2 ilustra un montaje con modelo de cera para el vaciado de seis (6) álabes de turbina. El montaje del modelo de cera incluye un modelo de copa de vertido 20, modelos de álabe de turbina 22 y modelos de colada 24a, 24b (mostrados como regiones estrechas en forma de costillas) que conectan cada modelo de álabe 22 al modelo de copa de vertido. Los patrones de los álabes de turbina 22 reproducen la forma de los álabes de turbina que se van a fundir e incluyen una región de raíz R, una región de plataforma P, una región de perfil aerodinámico F y una región de punta T en donde, como resultado, la sección transversal de cada modelo 22 varía significativamente a lo largo de su longitud. En la Figura 2, los modelos de álabe de turbina 22 se muestran conectados a la copa de vertido con una orientación de raíz hacia arriba y de punta hacia abajo, pero también pueden conectarse con una orientación de raíz hacia abajo y de punta hacia arriba, aunque esto no es lo preferible para los álabes de turbina que se muestran en la Figura 2, que tienen regiones de raíz mucho más grandes que las regiones de punta. El montaje del modelo se sumerge repetidamente en limo cerámico, se escurre del exceso de limo y se estuca con partículas cerámicas aplicadas sobre el limo cerámico para construir un montaje de molde de carcasa M sobre el montaje del modelo, Figura 3, en donde el molde de carcasa está representado por la línea punteada alrededor del montaje del modelo. El montaje del modelo se retira selectivamente del montaje del molde de la carcasa mediante autoclave de vapor u otra técnica de calentamiento, y luego el montaje del molde de la carcasa se comete a cocción para desarrollar la resistencia adecuada del molde para la fundición. El montaje del modelo de la carcasa incluirá seis cavidades del molde MC con una forma que corresponda a la de los modelos 22 de álabe de la turbina con cada cavidad del molde del álabe conectada a una copa de vertido por un paso de colada respectivo formado por el retiro de los modelos de colada 4a, 24b como es bien sabido.

La presente invención puede practicarse utilizando moldes de envoltura cerámicos convencionales fabricados de la

manera descrita anteriormente. Alternativamente, el molde de carcasa de envoltura se fabrica de manera que tenga una pared de molde relativamente delgada y/o conductora del calor que defina la cavidad del molde en forma de álabe de turbina para facilitar la extracción de calor en la(s) zona(s) de enfriamiento activo. Un molde de carcasa de envoltura para su uso en la práctica de la invención puede estar compuesto por múltiples capas de envoltura con diferentes coeficientes de expansión térmica para establecer una fuerza de compresión en una capa más interna del molde cuando éste está caliente, tales como las utilizadas en los procesos de solidificación monocristalina y direccional. Por ejemplo, la Figura 3A muestra esquemáticamente una pared de molde de carcasa de envoltura que es delgada y conductora del calor gracias a que incluye de dos a tres capas de lodo y estuco menos que los moldes de carcasa de envoltura convencionales, en donde la estructura de la capa interior del molde está hecha de un material cerámico de baja conductividad térmica y alta expansión térmica y la estructura de la capa exterior está hecha de un material cerámico de alta conductividad térmica y baja expansión térmica. En la práctica de la invención resulta útil un molde de carcasa de envoltura que tenga propiedades de refrigeración por radiación del 30 % o superiores a las de un molde convencional. El molde de carcasa de envoltura también puede comprender una capa intermedia y/o exterior de molde que incorpore una envoltura de refuerzo de fibra como la divulgada en la patente estadounidense 4,998,581 para una envoltura de refuerzo de fibra de alúmina o de mullita y Patente de EE. UU. 6,364,000 para una envoltura de refuerzo de fibra a base de carbono (por ejemplo, grafito) para proporcionar una fuerza de compresión en la capa más interna del molde. El molde también puede contener filamentos u otras fibras discontinuas de refuerzo en las capas intermedias para aumentar la resistencia a la tracción en verde y en cocimiento del molde, como en la patente de EE. UU. 6,648,060.

La Figura 4 ilustra esquemáticamente un aparato de fundición equiaxial que tiene zonas de gas refrigerante activas Z1, Z2, Z3 de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención para fundir uno o más álabes de turbina de gas en el montaje de molde de carcasa M del tipo descrito anteriormente y mostrado en la Figura 3. El aparato de fundición incluye una cámara de fundición al vacío superior 30a en la que están dispuestos un crisol de fusión por inducción 40 y un horno de calentamiento de moldes 50 y una cámara de enfriamiento al vacío inferior 30b que, a efectos ilustrativos, se muestra con múltiples zonas de enfriamiento activa Z1, Z2, Z3 inmediatamente por debajo de la parte inferior del horno de calentamiento de moldes 50, aunque la invención utiliza una o más zonas de enfriamiento activas. El crisol de fusión por inducción 40 está previsto para fundir al vacío una carga sólida de la superaleación que se va a fundir, y también para calentar la masa fundida en el crisol a una temperatura de recalentamiento deseada para la fundición. El crisol 40 puede girar para verter la masa fundida en el montaje del molde subyacente en el horno de calentamiento del molde o puede incluir una abertura de descarga con válvula inferior para este mismo fin, como es bien sabido.

En la Figura 4, se muestra el montaje del molde de carcasa M similar al mostrado en la Figura 3 después de retirar los modelos de cera y después de la cocción para desarrollar la resistencia del molde para la fundición para fundir múltiples álabes de turbina a la vez. El montaje del molde de la carcasa a fundir se coloca en una placa enfriadora enfriada por agua 61 sobre un martinete 63 que se desplaza hacia arriba y hacia abajo mediante un accionador hidráulico, eléctrico o de otro tipo 65. El montaje del molde de carcasa se mueve en relación con la pantalla protectora contra la radiación o deflector 57 que define una zona superior relativamente caliente y una zona inferior relativamente fría, como es bien sabido. En la Figura 4, se muestra esquemáticamente el montaje del molde de carcasa M con los extremos inferiores cerrados de las cavidades del molde de álabe apoyados sobre la placa enfriadora 61. Alternativamente, los extremos inferiores cerrados del montaje del molde de carcasa pueden descansar sobre un miembro de aislamiento térmico (no mostrado) en la placa enfriadora 61 para reducir o eliminar la conducción de calor a la placa enfriadora.

La Figura 5 ilustra otra realización para la práctica de la invención, en donde un molde sencillo M' de sección transversal uniforme representado esquemáticamente tiene un extremo inferior abierto que descansa directamente sobre la placa enfriadora 61 de tal manera que pueden formarse granos columnares alargados en el extremo inferior del artículo fundido adyacente a la placa de enfriamiento 61 a medida que el molde se desplaza más allá del deflector 57 del horno de calentamiento del molde (no mostrado, pero similar al de la Figura 4 en la cámara superior de fundición en vacío 30a) a través de la única zona de enfriamiento activa Z1 en la cámara de enfriamiento por vacío inferior 30b. El extremo inferior del molde puede cerrarse alternativamente como mediante una pared inferior cerámica delgada de un molde de carcasa cerámica, tal como el ilustrado en la Figura 4. Esta realización puede requerir la eliminación (mediante corte u otro mecanizado) de los granos columnares presentes en el extremo inferior del álabe fundido y también el diseño de la forma de la cavidad del molde para alojar esta porción sacrificable del artículo fundido. Alternativamente, el artículo puede vaciarse intencionadamente en el molde M' con una microestructura de grano columnar (o monocristalino) en una región inferior como la mostrada y una región superior de microestructura de grano equiaxial conforme a una realización de la invención para proporcionar un componente de microestructura dual como el descrito a continuación. Se puede proporcionar una región inferior monocristal colocando un selector de cristal y/o un iniciador (por ejemplo, un selector de cristal de cola en espiral (*pigtail*) y/o una semilla iniciadora) adyacente al extremo inferior del molde, como es bien sabido.

La temperatura del molde puede controlarse mediante el horno de calentamiento del molde 50, Figura 4, de manera que se mantenga por encima de la temperatura de solidificación de la superaleación (la temperatura de fusión es sustancialmente igual a la temperatura del molde) a lo largo de la longitud del molde hasta que el montaje del molde se enfríe activamente a lo largo de su longitud en las zonas de enfriamiento activo Z1, Z2, Z3. Alternativamente, la temperatura del molde puede ser controlada por el horno de calentamiento del molde 50 de manera que se mantenga por encima de la temperatura de fusión de la superaleación a lo largo de la longitud del molde hasta que el montaje del molde se enfríe activamente a lo largo de su longitud en las zonas de enfriamiento activo Z1, Z2, Z3. La elección de una temperatura de molde particular se determinará junto con la tasa de retirada del molde y la tasa de flujo másico de gas

refrigerante de una o varias zonas de gas refrigerante activas, tal y como se describe a continuación, para formar una microestructura de grano equiaxial y solidificado progresivamente a lo largo de al menos una parte de la longitud del álabe de turbina fundido.

5 El horno de calentamiento del molde 50 incluye una pared vertical formada por una camisa anular de aislamiento térmico 51 alrededor de un susceptor anular de grafito 53 con bobinas de inducción 55 dispuestas alrededor de la camisa de aislamiento térmico para el calentamiento por inducción del susceptor 53, que a su vez calienta el montaje del molde M que contiene la masa fundida para controlar la temperatura del molde y, por lo tanto, la temperatura de la masa fundida. La temperatura de la masa fundida en el montaje del molde M puede controlarse para que sea sustancialmente uniforme a lo largo de la cavidad del molde en una realización. Alternativamente, se puede proporcionar un perfil de temperatura no uniforme de la masa fundida a lo largo de la longitud del molde en función de la sección transversal particular del artículo que se vaya a fundir, con el fin de lograr la microestructura deseada a lo largo de la longitud del artículo que se vaya a fundir.

15 El horno de calentamiento de moldes 50 incluye la pantalla protectora contra la radiación o deflector 57 en el extremo inferior abierto a través del cual el montaje de molde de carcasa M se extrae del horno 50 hacia la cámara de enfriamiento inferior 30b.

20 Una vez introducida la masa fundida en el montaje del molde de carcasa precalentado, el montaje del molde que contiene la masa fundida y el horno de calentamiento del molde 50 se mueven relativamente para retirar el conjunto del molde que contiene la masa fundida M (o M' de la Figura 5) del horno 50 a través de la abertura del deflector 57 y, a continuación, inmediatamente a través de las múltiples zonas de enfriamiento activas Z1, Z2, Z3 (o zona de enfriamiento única Z1 en la Figura 5) en donde el gas refrigerante se dirige contra el exterior del molde para extraer activamente el calor. En referencia a la Figura 4, el montaje del molde M que contiene la masa fundida se retira normalmente del horno 50 mediante el descenso del martinete 63 utilizando el accionador 65 a una tasa de retirada del molde predeterminada y/o controlada por realimentación. Alternativamente, el horno 50 puede moverse con respecto al montaje del molde M, o tanto el horno como el montaje del molde pueden moverse relativamente para retirar del horno 50 el molde que contiene la masa fundida.

30 En referencia a la Figura 4, se muestran múltiples zonas de gas refrigerante activas Z1, Z2, Z3 en posición fija inmediatamente debajo del deflector del horno 57, de modo que el montaje del molde que contiene la masa fundida se desplaza sucesivamente a través de las zonas de gas refrigerante activas mediante el descenso del martinete 63, aunque las zonas de enfriamiento activas pueden montarse de modo que sean móviles a lo largo del recorrido cuando el horno es móvil. En la práctica de la invención puede utilizarse cualquier número de zonas de enfriamiento activas. A título ilustrativo y no limitativo, cuando se emplean las zonas de enfriamiento activas Z1 y Z2, la primera zona de gas refrigerante Z1 puede situarse 2,54 cm (una pulgada) u otra distancia adecuada por debajo del deflector 57, mientras que la segunda zona de gas refrigerante puede situarse 7,62 cm (tres pulgadas) u otra distancia adecuada por debajo del deflector 57.

40 A título ilustrativo y no limitativo, la primera, segunda y tercera zonas activas de gas refrigerante Z1, Z2 y Z3 están asociadas a un colector anular común de suministro de gas refrigerante M1 mostrado en la Figura 6 y situado en torno a la trayectoria de retirada del molde del horno, de modo que el montaje del molde que contiene la masa fundida pasa a través del colector a medida que desciende sobre el martinete 63. Una pluralidad de boquillas de descarga de gas refrigerante N1, N2, N3 están montadas en respectivos colectores de gas tubulares verticales secundarios T1, que se comunican con el colector principal M1. Las boquillas N1, N2, N3 de los colectores T1 están espaciadas alrededor de la circunferencia del colector M1 y descargan gas refrigerante a presión y a un flujo másico de gas refrigerante predeterminado y/o controlado por realimentación hacia y contra la superficie exterior del montaje del molde a su paso por las zonas de enfriamiento Z1, Z2, Z3. La invención prevé el uso de múltiples colectores anulares separados en lugar del colector anular único M1, cada colector con sus respectivas boquillas de descarga de gas refrigerante N1, N2, N3 montadas directamente en ellos o en colectores de gas secundarios montados en ellos. Las boquillas de descarga de gas pueden ser de tipo ventilador, niebla, cono o cono hueco, o de cualquier otro tipo adecuado para dirigir chorros de gas concentrados o confinados al molde. Por ejemplo, la Figura 7A ilustra boquillas de ventilador en la zona de enfriamiento Z1, boquillas de cono en la zona de enfriamiento Z2 y boquillas de niebla en la zona de enfriamiento Z3 con fines meramente ilustrativos y no limitativos. La invención prevé que las boquillas de descarga de gas puedan espaciarse de forma equitativa o desigual alrededor del colector anular M1 para lograr un efecto de enfriamiento activo deseado para una forma de molde determinada que se retira. Del mismo modo, en cada colector puede haber boquillas de descarga de gas de distintos tipos y en distintas disposiciones para lograr el efecto de enfriamiento deseado para una forma de molde determinada que se retira.

60 La práctica de la invención puede llevarse a cabo utilizando boquillas N1, N2, N3 del tipo convencional de niebla, ventilador, cono o cono hueco que son inicialmente ajustables para ajustar la dirección y el ángulo del patrón de descarga del gas refrigerante, y luego se aprietan para fijar la posición ajustada de la boquilla. La pluralidad de boquillas de descarga de gas que definen una periferia de la zona de enfriamiento activa proporcionan una corriente de gas que es principalmente un flujo de gas turbulento en la primera zona de enfriamiento y un flujo de gas laminar en la segunda zona de enfriamiento, o viceversa, en donde puede proporcionarse un número adicional de zonas de enfriamiento activas de diferentes tipos para lograr el efecto de enfriamiento activo y la microestructura deseados a lo largo de la longitud del artículo fundido. Las dos disposiciones ilustrativas típicas de las matrices de boquillas se basan principalmente en el enfriamiento por impacto o en el enfriamiento por película. Las boquillas de descarga de gas pueden estar espaciadas

igual o desigualmente entre sí o dispuestas en otras matrices en los colectores dependiendo de la forma del molde que contiene la masa fundida que se retira.

La invención prevé el uso de boquillas de descarga de gas refrigerante N1, N2, N3 que pueden alinearse y fijarse en la posición/orientación deseada en el colector M1 o, alternativamente, pueden moverse o girar sobre el mismo mediante motores individuales, accionadores u otros mecanismos de movimiento de boquillas (no mostrados) para variar sus orientaciones verticales y horizontales en relación con el montaje del molde M a medida que se retira.

La eficacia del enfriamiento por gas se ve afectada por la distancia y la inclinación (orientación vertical) de las boquillas con respecto al molde M, por el número y el tipo de boquillas utilizadas para enfriar una forma de molde determinada y por la presión del gas refrigerante, ya que a mayor presión de gas refrigerante mayor flujo másico y mayor velocidad de impacto del gas en el molde. La extracción de calor puede optimizarse mediante el control de la presión del gas o del flujo volumétrico de gas, o de ambos, con este fin. Por ejemplo, la Figura 7B ilustra boquillas de ventilador N1 de 30° en la zona de enfriamiento Z1, boquillas de ventilador N2 de 50° en la zona de enfriamiento Z2 y boquillas de ventilador N3 de 65° en la zona de enfriamiento Z3 a efectos ilustrativos. La Figura 7C ilustra diferentes tipos de acción de la velocidad de impacto sobre la pared del molde como forma de optimizar la extracción de calor del molde que contiene la masa fundida mediante la optimización de la distancia y el diámetro (y también del tipo) de las boquillas de descarga de gas empleadas en las zonas de enfriamiento; específicamente, un efecto de impacto de alta velocidad del gas, un efecto de impacto de velocidad intermedia del gas y un efecto de impacto de baja velocidad del gas, variando la distancia de la boquilla a la pared del molde y el diámetro del orificio de la boquilla, tal como se muestra. La secuenciación de las boquillas y sus inclinaciones en la(s) zona(s) de enfriamiento suele ser específica para cada pieza (basada en una geometría de fundición concreta) para variar el enfriamiento por impacto o por película necesario. Por ejemplo, cuando se desea un enfriamiento por impacto, tanto la presión como el volumen del gas refrigerante pueden ser elevados. En la refrigeración por película, la presión puede ser baja pero se compensa con un mayor volumen de gas refrigerante para mantener el mismo flujo másico de gas refrigerante.

Con fines ilustrativos y no limitativos, la Figura 4 ilustra esquemáticamente orientaciones ejemplares de las boquillas de descarga de gas refrigerante N1, N2, N3 en las respectivas zonas de enfriamiento activas Z1, Z2, Z3 en relación con el montaje del molde de carcasa M que se retira.

A efectos aún más ilustrativos y no limitativos, la Figura 8 muestra una orientación horizontal ejemplar de las boquillas de descarga de gas refrigerante de tipo ventilador N1 en una primera zona de enfriamiento Z1 y de las boquillas de descarga de gas refrigerante de tipo niebla N2 en una segunda zona de enfriamiento activa inferior Z2 en relación con una cavidad de molde de carcasa MC que se retira para optimizar la refrigeración de acuerdo con otra realización de la invención. En la Figura 8, el ventilador y las boquillas de descarga de gas refrigerante tipo niebla N1 y N2 (u otras boquillas, tales como tipo cono o huecas) se muestran en un patrón o conjunto no circular alrededor de la cavidad del molde MC que se retira hacia este extremo con el fin de ilustrar esta realización. Los patrones del gas refrigerante se muestran mediante las regiones en forma de cuña R1, R2 de las respectivas boquillas N1, N2. El colector anular de gas refrigerante en el que residen las boquillas de descarga de gas refrigerante también puede configurarse de forma no circular con este fin dependiendo de la forma particular del molde que se refrigera con gas y puede incluir un aditamento de montaje respectivo (placa metálica) en el que pueden montarse las matrices de boquillas en el colector anular para facilitar el montaje y el ajuste de las boquillas en relación con el molde.

Las orientaciones horizontal y vertical de las boquillas de descarga de gas en la(s) zona(s) de enfriamiento se eligen para proporcionar la máxima extracción de calor (por impacto o enfriamiento por película) del molde que contiene la masa fundida.

La(s) zona(s) de enfriamiento activas Z2, Z3, etc. complementa(n) la capacidad de extracción de calor de la zona de enfriamiento activa Z1. La distancia entre las zonas de enfriamiento Z1, Z2, Z3, etc., así como otras zonas de enfriamiento adicionales, puede variar en función de los ángulos verticales de las boquillas y del número de boquillas utilizadas. En la práctica de la invención puede utilizarse cualquier número de zonas de enfriamiento activas múltiples.

El colector anular de gas refrigerante M1 se suministra con un gas refrigerante que no es reactivo con la masa fundida desde las tuberías de suministro de gas o conducto C1, Figura 6, y comprende típicamente un gas inerte, tal como argón, helio y mezclas de los mismos, u otro gas adecuado, a temperatura ambiente o próxima a ella, o a otra temperatura adecuada del gas refrigerante. Los tipos y proporciones de los gases de reposición individuales que componen el gas refrigerante pueden seleccionarse como se desee para lograr un efecto de enfriamiento activo deseado en función de los tipos, números y orientaciones de las boquillas de descarga de gas empleadas. El gas refrigerante se suministra al colector M1 a través de la línea o conducto C1 conectado a un controlador de caudal másico, como se muestra en la Figura 4 y como se describe a continuación con más detalle.

A medida que el montaje del molde que contiene la masa fundida se retira del horno 50 y se aproxima a las zonas de gas refrigerante activas Z1 y Z2, determinadas por la detección de la distancia de retirada del molde fuera del horno, la presente invención prevé el ajuste predeterminado o por realimentación de al menos una de la tasa de retirada del molde, las tasas de flujo másicos de gas refrigerante de las boquillas N1, N2, N3, y la temperatura del molde en función de que una sección transversal particular de la cavidad del molde del álabe alcance la zona de enfriamiento activa (es decir, que

el molde alcance una distancia de retirada próxima a la(s) zona(s) de enfriamiento activa(s)) con el fin de solidificar progresivamente la masa fundida en la cavidad del molde del artículo con una microestructura de grano equiaxial a lo largo de la longitud de la cavidad del molde. El ajuste de al menos uno de los índices variables de retirada del molde, el índice variable de flujo másico de gas refrigerante y la temperatura variable del molde durante la retirada del molde puede 5 predeterminarse mediante un programa informático de proceso almacenado en un dispositivo de control informático Controlador de accionador/Potencia de Temperatura basado en la distancia de retirada del molde fuera del horno de calentamiento del molde 50 o puede controlarse conforme a la retroalimentación de uno o más termopares TC1, TC2, TC3 colocados a lo largo de la trayectoria de retirada del molde y de los cuales uno, más o todos proporcionan señales de temperatura del molde y/o de la masa fundida a un dispositivo de control informático (TC1 se muestra proporcionando 10 señales en la Figura 4 simplemente por conveniencia). El Controlador de Accionador/Potencia de Temperatura, Figura 4, está interconectado con el accionador 65 del martinete de movimiento del molde, con el controlador de flujo másico del colector de gas refrigerante M1 y con las bobinas de inducción 55 para variar los parámetros de fundición con el fin de conseguir la microestructura deseada a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo que se funde. La tasa de flujo másico de gas refrigerante puede variarse mediante un controlador de flujo másico que suministra gas refrigerante al colector M1 y/o variando el número de boquillas de descarga de gas refrigerante accionadas para descargar gas refrigerante a medida que una sección particular del molde pasa por las zonas de enfriamiento. El regulador de flujo 15 másico puede ser un regulador de flujo másico disponible en el mercado.

El ajuste puede realizarse basándose en experimentos empíricos que determinen la velocidad de retirada y/o la tasa de flujo de gas refrigerante adecuados a una carga térmica del molde dada para conseguir la microestructura equiaxial solidificada progresivamente deseada a lo largo de al menos una parte de la longitud del álabe fundido, o basándose en modelos de simulación por ordenador de la solidificación de la masa fundida en la cavidad del molde en diferentes condiciones de temperatura del molde, tasa de retirada y tasa de flujo másico de gas refrigerante para una carga térmica del molde dada, o basándose en un bucle de retroalimentación de termopares como se ha comentado anteriormente. La 20 información para lograr el ajuste predeterminado puede plasmarse en un algoritmo de control almacenado en un dispositivo de control informático Controlador de accionador/Potencia de Temperatura adecuado que controle el accionador de martinete 65, el controlador del flujo másico y las bobinas de inducción 55 para lograr la microestructura de grano equiaxial solidificado progresivamente a lo largo de al menos una parte de la longitud del álabe fundido *in situ*. Además, la invención prevé opcionalmente controlar también la temperatura del molde y, por tanto, la temperatura de la masa fundida en función de una sección transversal particular del artículo que llegue a la(s) zona(s) de enfriamiento activa(s), en donde puede exigirse una temperatura más baja para una región de sección transversal mayor del álabe que se acerque a las zonas de enfriamiento activas para reducir el contenido total de calor, o viceversa. La aproximación del molde a la zona de enfriamiento activa puede detectarse detectando la distancia de retirada del molde fuera del horno de calentamiento del molde 50 mediante un sensor de posición del martinete 65a asociado al accionador 65 o parte del mismo, a efectos ilustrativos. El dispositivo de control informático también puede controlar las bobinas de inducción 55 con este fin de acuerdo con un horario programado y/o con la retroalimentación del termopar.

La presente invención puede practicarse utilizando una, dos o todas las zonas de enfriamiento activas Z1, Z2, Z3 en función de las condiciones de la fundición. Sin embargo, se prefiere el uso de las zonas de enfriamiento activas Z1, Z2, 40 así como de otras zonas de enfriamiento adicionales opcionales, para que estas últimas zonas de enfriamiento Z1, Z2, etc., puedan seguir extrayendo calor del molde y, por tanto, de la masa fundida, para evitar cualquier aumento perjudicial de la temperatura de la masa fundida ya solidificada por efecto del metal fundido que se encuentra sobre ella durante la retirada del molde.

La práctica de la presente invención, tal como se ha descrito anteriormente, produce un álabe de turbina fundido que tiene una estructura de grano equiaxial progresivamente solidificada a lo largo de al menos una parte de su longitud y que está sustancialmente desprovista de granos de enfriamiento (granos superficiales muy finos) y de granos columnares. Preferiblemente, el álabe de turbina fundido también está sustancialmente desprovisto de porosidad interna a lo largo de su longitud. Un álabe fundido, que comprende una superaleación de base de níquel o cobalto, puede tener un tamaño de grano equiaxial solidificado progresivamente con un tamaño de grano ASTM en el rango de 1 a 3. 50

El logro de la microestructura de grano equiaxial y solidificado progresivamente a lo largo del álabe de la turbina es además ventajoso para reducir sustancialmente la segregación microestructural de fases que, a su vez, permite que el álabe fundido pueda tratarse térmicamente por disolución posteriormente a mayor temperatura sin incurrir en una fusión incipiente. La mayor temperatura de tratamiento térmico por disolución favorece la precipitación de una gran cantidad de precipitados finos de gamma prima en una superaleación de base de níquel durante el enfriamiento del tratamiento térmico y el posterior envejecimiento, y estos precipitados finos confieren las propiedades mecánicas requeridas a la superaleación.

La Figura 9 ilustra al 1X la microestructura de grano equiaxial producida conforme a la presente invención en comparación con la Figura 10, que ilustra al 1X la microestructura de grano equiaxial producida por fundición equiaxial convencional. La mejora de la uniformidad del tamaño del grano es evidente en la Figura 9. 60

Las Figuras 11A, 11B y 11C tomadas con un aumento de 50X ilustran las respectivas microestructuras de grano equiaxial producidas por el proceso MX de bajo sobrecalentamiento (Patente de EE. UU. 5,498,132), por la práctica de la presente invención, y por la fundición equiaxial convencional de una superaleación a base de níquel, respectivamente. La 65

granulometría ASTM producida por MX de la Figura 11A se sitúa en el rango de 2 a 5. En la Figura 11C, el tamaño de grano ASTM de fundición *in situ* equiaxial convencional está en el rango de 0 a 1. En la Figura 11B, el tamaño de grano equiaxial ASTM de una pieza fundida conforme a la invención está en el rango de 0 a 3. En las Figuras 11A, 11B, 11C, la pieza fundida está compuesta por una superaleación a base de níquel.

La Figura 12 es un gráfico que resume esquemáticamente la porosidad de fundición ejemplar frente a la tasa de solidificación producida por fundición equiaxial convencional en donde "x %" representa un nivel de porosidad típico, por la práctica de la presente invención (GAPS) y por el proceso MX. Puede observarse que el proceso conforme a la invención produce la microporosidad más baja.

La Figura 13C tomada con un aumento de 25X ilustra la porosidad dispersa presente en una microestructura de grano equiaxial producida por el proceso MX de bajo sobrecalentamiento. La Figura 13A tomada con el aumento indicado por la barra de escala de 0,254 mm (= 10 mil) ilustra la porosidad dendrítica y situada que está presente en una microestructura de grano equiaxial producida por una fundición equiaxial convencional. La Figura 13B muestra que hay poca o ninguna microporosidad (menos del 1 %) en la microestructura equiaxial producida según la invención. En las Figuras 13A, 13B, 13C, la pieza fundida está compuesta por una superaleación a base de níquel.

Ejemplo 1

Una aleta de motor de turbina de gas industrial mostrada en la Figura 14 se fabricó conforme a una realización de la invención con una microestructura de grano equiaxial solidificada progresivamente.

Se empleó un aparato de fundición similar al de la Figura 4 utilizando un molde de una sola carcasa del tipo mostrado en la Figura 4A y utilizando la zona de gas refrigerante activa Z1 con boquillas de descarga de gas refrigerante de tipo niebla (5° de inclinación y 50,8 mm (= 2 pulgadas) de distancia boquilla-molde promedio) y la zona de enfriamiento activa inferior Z2 con boquillas de descarga de gas refrigerante de tipo ventilador (5° de inclinación y 76 mm (= 3 pulgadas) de distancia boquilla-molde promedio). La pared del molde de carcasa comprendía doce capas en total para hacerla conductora del calor, en donde las capas interiores del molde comprendían diversas capas de inmersión de circón y alúmina (o inmersión de circonio, circón o mullita) con estuco de alúmina o circón aplicado sobre las inmersiones y en donde las capas exteriores comprendían inmersión de sílice con estuco de circón o alúmina sobre las inmersiones. Las zonas de gas refrigerante Z1 y Z2 se situaron a una distancia respectiva de 2,54 cm y 7,62 cm (una pulgada y tres pulgadas) por debajo del deflector de radiación 57 del horno.

Los parámetros de fundición utilizados para fundir este molde y la aleta de la turbina en superaleación de base de níquel U500 incluyeron:

Temperatura del molde = 1385 °C (= 2525 °F)

Temperatura de fusión = 1440,6 °C (= 2625 °F)

Velocidad de retirada del molde: rango de 457 mm/hora a 610 mm/hora (= 18 pulgadas/hora a 24 pulgadas/hora)

La tasa de flujo másico del gas refrigerante (mezcla de argón con un 20 % de helio) fue: de 2265 l (= 80 pies cúbicos) por minuto a 8495 l (= 300 pies cúbicos) por minuto (a una presión constante del gas argón = 827,37 kPa (120 psi [= 8,27 bar])) proporcionando una tasa de flujo másico de gas refrigerante de 0,453 a 2,268 kg/minuto (= 1 a 5 libras/minuto) (a ambas zonas Z1 y Z2).

La extracción de calor del molde que contenía el metal para solidificar progresivamente una estructura de grano equiaxial a lo largo de la longitud del molde se controló mediante un algoritmo de control generado a partir de modelos de solidificación de simulación por ordenador y almacenado en un ordenador de control del proceso. En la Figura 14A se muestran los ajustes preprogramados de la velocidad de retirada del molde y de la tasa de flujo másico de gas refrigerante con una temperatura del molde casi constante en función de la distancia de retirada del molde (utilizando la posición del martinete móvil del molde 63) a medida que el molde se retiraba del horno. La tasa de extracción de calor se controló así para mantener una nucleación y un crecimiento de cristales (granos) sustancialmente fijos en la masa fundida, de modo que se produjera un número uniforme de cristales y una densidad de grano constante en la fundición. En comparación con los parámetros de solidificación del perfil aerodinámico, es evidente que, en la región de la raíz, la tasa de retirada del molde es más lenta y la tasa de flujo másico de gas refrigerante es mucho mayor para proporcionar la mayor extracción de calor necesaria en la masa pesada de la región de la raíz.

Ejemplo 2

Este ejemplo se ofrece para ilustrar la producción de un artículo de fundición (álabe de turbina simulado) conforme a una realización de la invención que tiene una microestructura dual que comprende una región de perfil aerodinámico F solidificada direccionalmente (por ejemplo, monocristal o de grano columnar) y una región de raíz de grano equiaxial R, tal como se ilustra en la Figura 15.

El artículo de superaleación de base de níquel se fundió con distintos parámetros de fundición para la región F del perfil aerodinámico de grano columnar o monocristalino y la región R de raíz de grano equiaxial del álabe de turbina simulado. La región de la raíz del grano equiaxial tenía una sección transversal variable, tal como la raíz ranurada típica de los

abetos. Se vació un molde de carcasa cerámica que tenía una cavidad de molde correspondiente a la forma de la turbina simulada de la Figura 15 con un extremo abierto de la región aerodinámica que residía en una placa enfriadora (como la placa enfriadora 61 de la Figura 4). Se incorporó un selector de cristal único de cola en espiral en el extremo de la punta abierta para seleccionar un cristal único para su propagación a través de la región del perfil aerodinámico de la cavidad del molde.

Los parámetros iniciales de fundición para la región del perfil aerodinámico del molde fueron:

Temperatura del molde superior a 1427° C (= 2600 °F)

Temperatura de fusión superior a 1427° C (= 2600 °F)

Velocidad de retirada del molde: 203 mm/hora (= 8 pulgadas/hora)

La tasa de flujo másico del gas refrigerante (mezcla de argón con un 20 % de helio) fue: 2265 l (= 80 pies cúbicos) por minuto (a una presión constante de gas argón = 827,37 kPa (120 psi [= 8,27 bar])) proporcionando una tasa de flujo másico de gas refrigerante de 0,453 kg/minuto (= 1 libra/minuto) a la zona de enfriamiento 1 (boquillas tipo ventilador -10° de inclinación y 63,5 mm (= 2,5 pulgadas) de distancia boquilla-molde promedio) de la zona de enfriamiento Z1 y a la zona de enfriamiento 2 (boquillas tipo niebla -5° de inclinación y 63,5 mm (= 2,5 pulgadas) de distancia boquilla-molde promedio).

Los parámetros de fundición posteriores para la región de la raíz del molde fueron:

Temperatura del molde inferior a 399° C (= 12550 °F)

Temperatura de fusión superior a 1427° C (= 2600 °F)

Velocidad de retirada del molde: 610 mm/hora (= 24 pulgadas/hora)

La temperatura del molde y, por lo tanto, la temperatura de la masa fundida, se redujeron de más de 1538 °C (= 2800 °F) a menos de 1399 °C (= 2550 °F) mediante el control de las bobinas de inducción del horno de calentamiento del molde. La tasa de flujo másico del gas refrigerante (mezcla de argón con un 20 % de helio) fue: 8495 l (= 300 pies cúbicos) por minuto (a una presión constante de gas argón = 827,37 kPa (120 psi [= 8,27 bar])) a ambas zonas Z1 y Z2.

En la Figura 15A se muestran los ajustes preprogramados de la tasa de retirada del molde, tasa de flujo másico de gas refrigerante y temperatura del molde en función de la distancia de retirada (utilizando la posición del martinete móvil del molde 63) a medida que el molde se retiraba del horno. En comparación con los parámetros de la solidificación direccional (DS) del perfil aerodinámico, se observa que, en la región de la raíz del grano equiaxial, la temperatura del molde es sustancialmente inferior, la tasa de retirada del molde es mucho mayor y la tasa de flujo másico de gas refrigerante también es mucho mayor para proporcionar una extracción de calor mucho mayor, necesaria para promover la solidificación de una microestructura de grano equiaxial.

Aunque la invención se ha descrito anteriormente en términos de realizaciones específicas de la misma, no se pretende que esté limitada a las mismas, sino sólo en la medida establecida a continuación en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

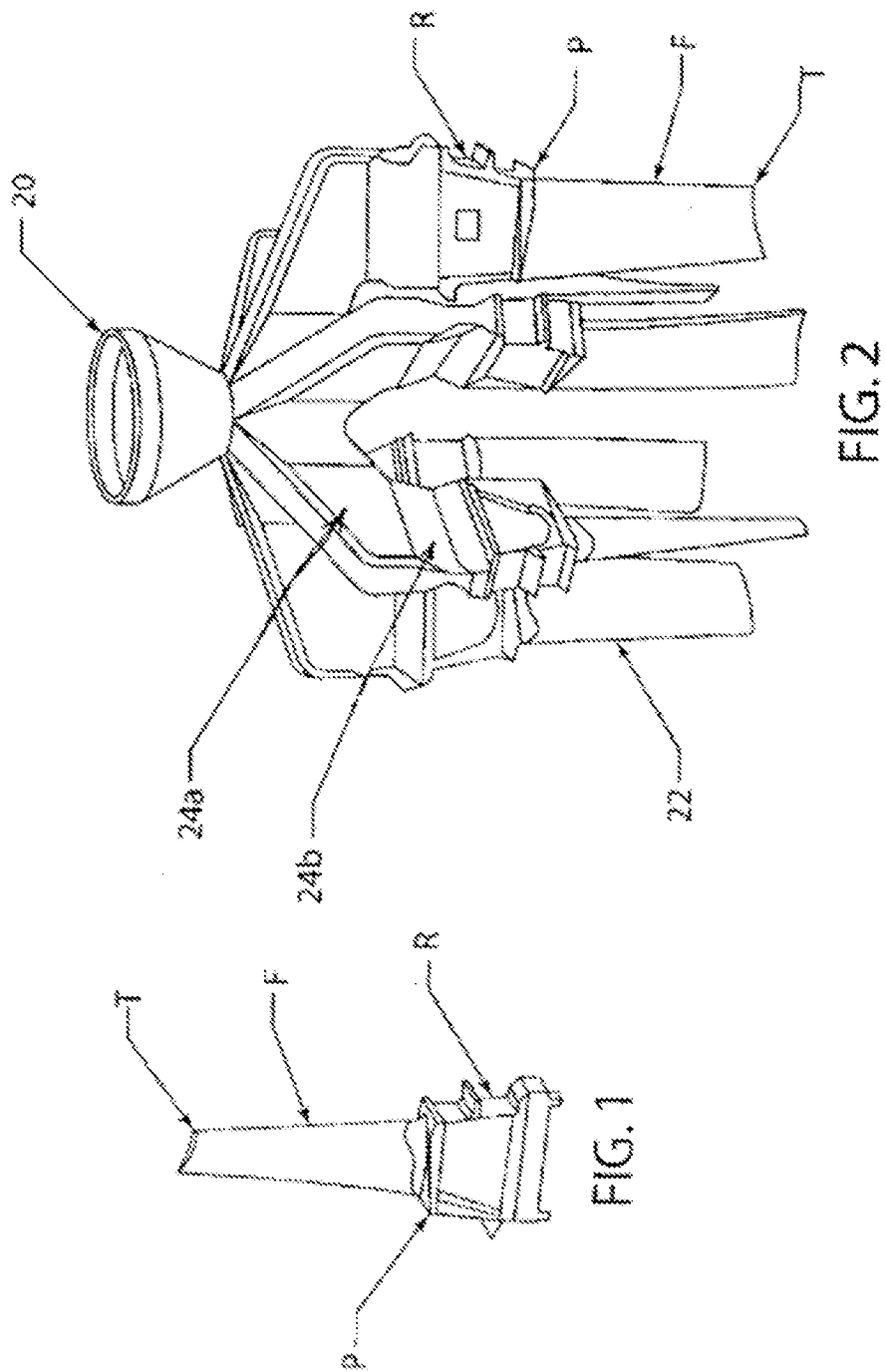
1. Un método de fundición de un artículo con acabado casi final, que comprende proporcionar una masa fundida que comprende material metálico fundido en un molde calentado en un horno de calentamiento de moldes a una temperatura superior a una temperatura de solidificación del material metálico en donde el molde tiene una cavidad de molde con forma de artículo correspondiente a la del artículo que se va a fundir, mover relativamente el molde que contiene la masa fundida y el horno para retirar el molde que contiene la masa fundida del horno a través de una zona de enfriamiento activa en donde el gas refrigerante se dirige contra el exterior del molde para extraer activamente el calor de manera que se solidifique la masa fundida allí con una microestructura de grano equiaxial a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo.
2. El método de conformidad con la reivindicación 1, en donde al menos uno o al menos dos de los siguientes parámetros: la tasa de retirada del molde del horno, la tasa de flujo másico del gas refrigerante y la temperatura del molde, se ajustan en función de que al menos una sección transversal concreta de la cavidad del molde en forma de artículo esté próxima a la zona de enfriamiento activo, con el fin de solidificar progresivamente la masa fundida con una microestructura de grano equiaxial.
3. El método de conformidad con la reivindicación 1 o 2, incluyendo la determinación de la posición de retirada del molde para determinar cuándo dicha al menos una sección transversal en particular está próxima a la zona de enfriamiento activa.
4. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que incluye retirar el molde que contiene la masa fundida a través de una primera zona de enfriamiento activa y, a continuación, a través de una o más zonas de enfriamiento activas adicionales que continúan la extracción de calor de la masa fundida en el molde.
5. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde el gas refrigerante se descarga desde una pluralidad de boquillas que definen una periferia de la zona de enfriamiento activa.
6. El método de conformidad con la reivindicación 5, en donde la zona activa incluye una pluralidad de zonas de enfriamiento dispuestas a lo largo de la dirección de retirada del molde, estando cada zona definida por una pluralidad de boquillas.
7. El método de conformidad con la reivindicación 6, en donde una de las zonas de enfriamiento proporciona un flujo de gas principalmente turbulento y otra de las zonas de enfriamiento proporciona un flujo de gas laminar.
8. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en donde la pluralidad de boquillas proporciona patrones de flujo de gas refrigerante en forma de ventilador, niebla, cono o cono hueco.
9. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde, antes de retirar el molde del horno, la temperatura de la masa fundida en el molde se controla para que sea sustancialmente uniforme a lo largo de la cavidad del molde.
10. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde antes de la retirada del molde del horno, la temperatura de la masa fundida en el molde se controla para que sea variable a lo largo de la cavidad del molde.
11. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que incluye controlar la temperatura de la masa fundida en el molde por encima de la temperatura de fusión o solidificación hasta que el molde se enfríe progresivamente en la zona de enfriamiento activa.
12. El método de conformidad con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en donde al menos una de la tasa de retirada del molde, la tasa de flujo másico del gas refrigerante y la temperatura del molde se controlan mediante un bucle de realimentación de termopar que mide la temperatura del molde.
13. Un uso de un aparato para fundir un artículo, el aparato comprende:
 - un horno (50) que tenga una cámara de calentamiento superior e incluya bobinas de inducción (55) en la cámara de calentamiento, en donde antes de la retirada del molde del horno (50), la temperatura de la masa fundida en el molde se controle para que sea sustancialmente uniforme a lo largo de la cavidad del molde mediante dichas bobinas de inducción (55), en donde el horno (50) incluya un deflector (57) en una abertura inferior y a través del cual el molde (M) pueda retirarse del horno (50) a una cámara de enfriamiento inferior (30b);
 - un miembro de soporte del molde sobre el que se dispone un molde (M) que tiene una cavidad de molde (MC) con forma de artículo para recibir la masa fundida, cuando el molde reside en la cámara de calentamiento del horno, en donde la cavidad de molde (MC) tiene una forma correspondiente a la del artículo que se va a fundir;
 - múltiples zonas de gas refrigerante activas (Z1, Z2, Z3) en una posición inmediatamente inferior al deflector (57);
 - un dispositivo accionador (65) para mover relativamente el miembro de soporte del molde y el horno (50) para retirar el molde que contiene la masa fundida (M) del horno a través de las zonas de gas refrigerante activas (Z1, Z2, Z3), en donde el gas refrigerante se dirige contra el exterior del molde que contiene la masa fundida (M) para extraer activamente el

calor; y

- un dispositivo de control interconectado con las bobinas de inducción (55), el dispositivo accionador (65) y un controlador de flujo másico que suministra gas refrigerante al menos a un colector de gas refrigerante (111) del aparato,

- 5 en donde el molde (M) se puede retirar del horno (50) mediante el descenso de un martinete (63) utilizando el dispositivo accionador (65) a una velocidad de retirada del molde predeterminada y/o controlada por realimentación;
 en donde las zonas de enfriamiento por gas activas (Z1, Z2, Z3) están definidas por una pluralidad de boquillas (N1, N2, N3) dispuestas alrededor de una trayectoria de retirada del molde;
 en donde el extremo inferior abierto del molde se apoya en el miembro de soporte del molde, y en donde el miembro de soporte es una placa enfriadora (61); y
 10 en donde, durante el uso del aparato, la elección de una temperatura de molde particular se determina conjuntamente con la tasa de retirada del molde y la tasa de flujo másico de gas refrigerante de una o más zonas de enfriamiento activas (Z1, Z2, Z3) para formar una microestructura de grano equiaxal solidificado progresivamente a lo largo de al menos una parte de la longitud del artículo.

- 15 14. El uso de conformidad con la reivindicación 13, en donde la pared del molde comprende múltiples capas con diferentes coeficientes de dilatación térmica para establecer una fuerza de compresión en una capa más interna del molde cuando éste está caliente.



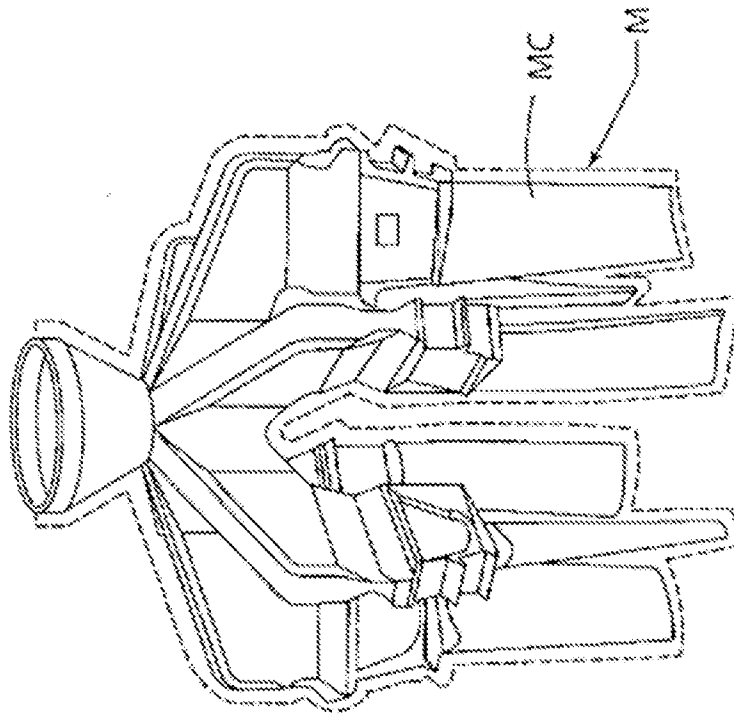


FIG. 3

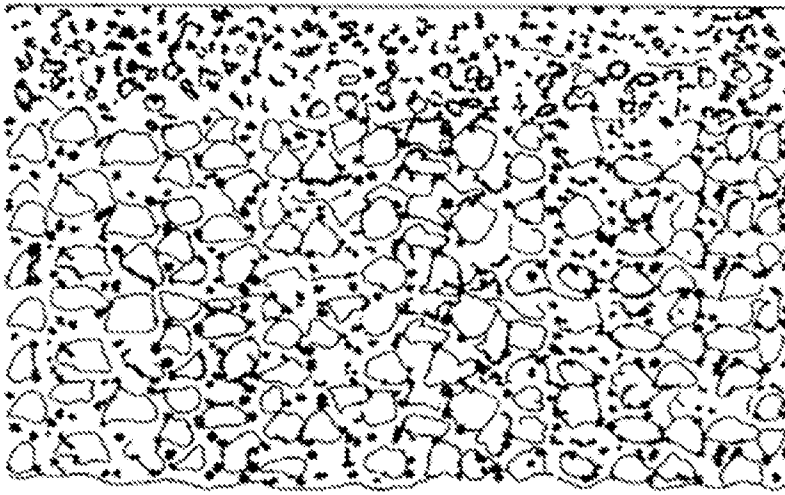


FIG. 3B

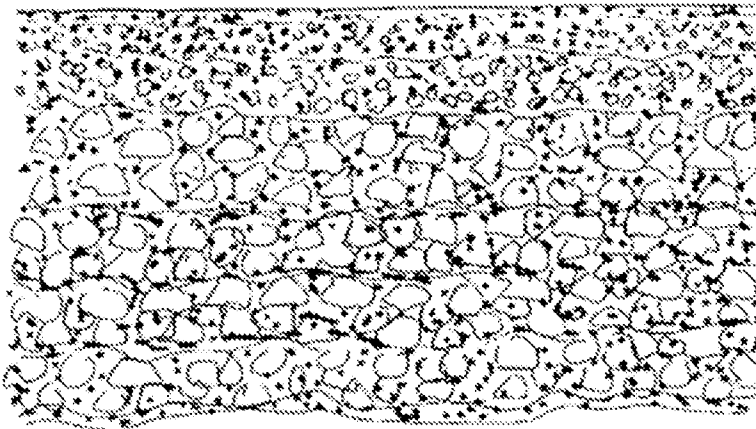


FIG. 3A

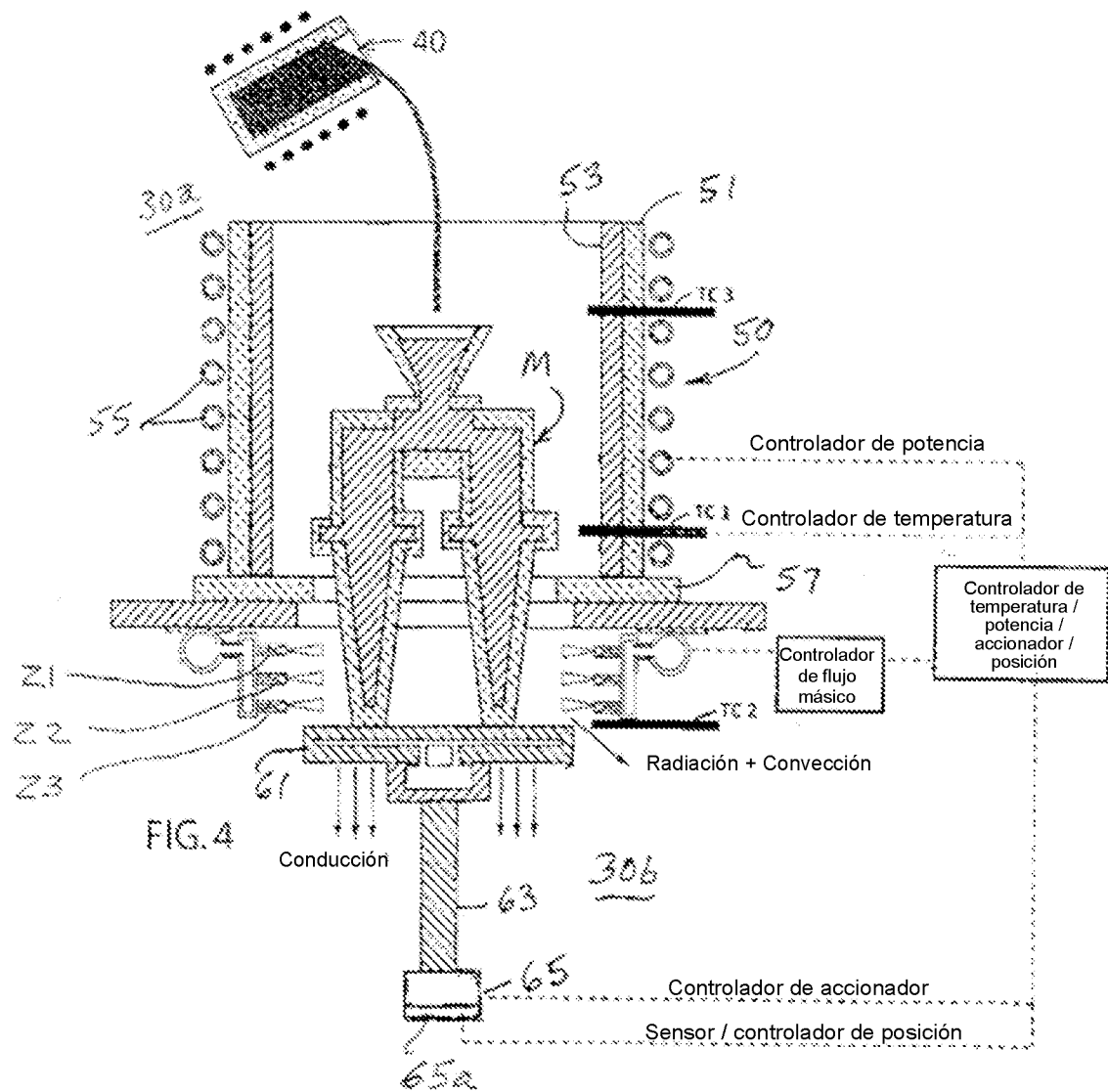
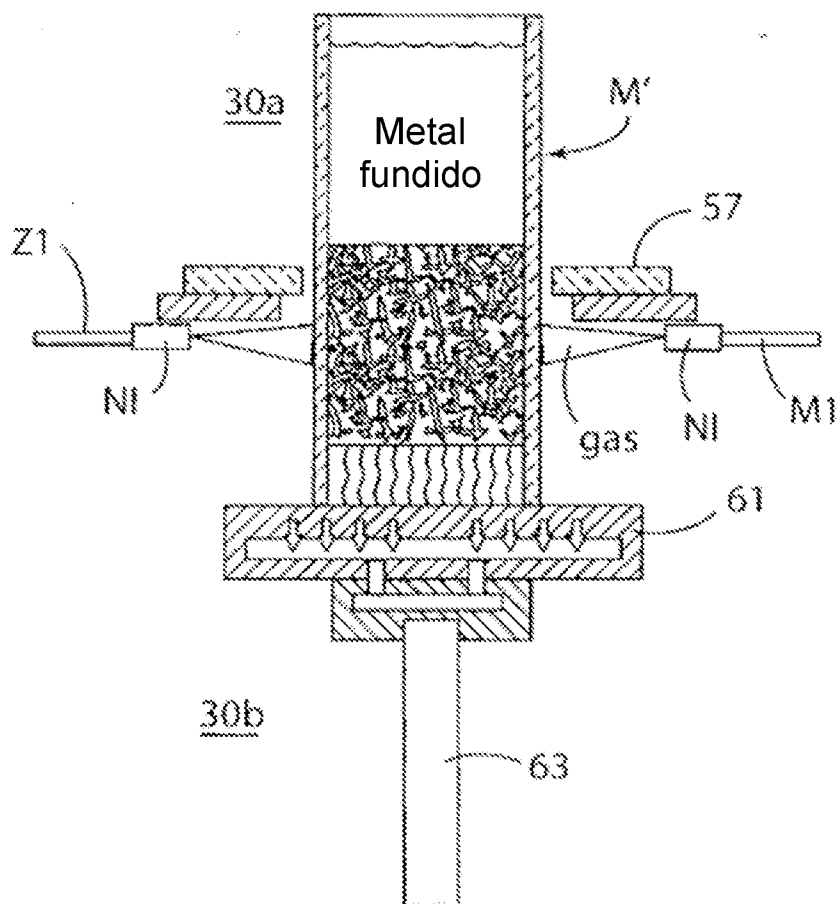


FIG. 5



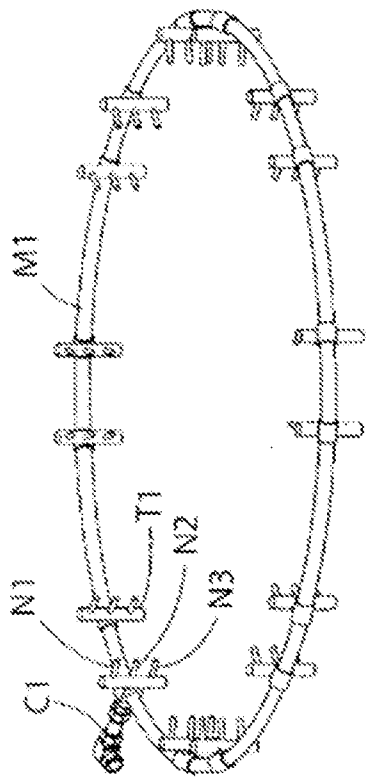


FIG. 6

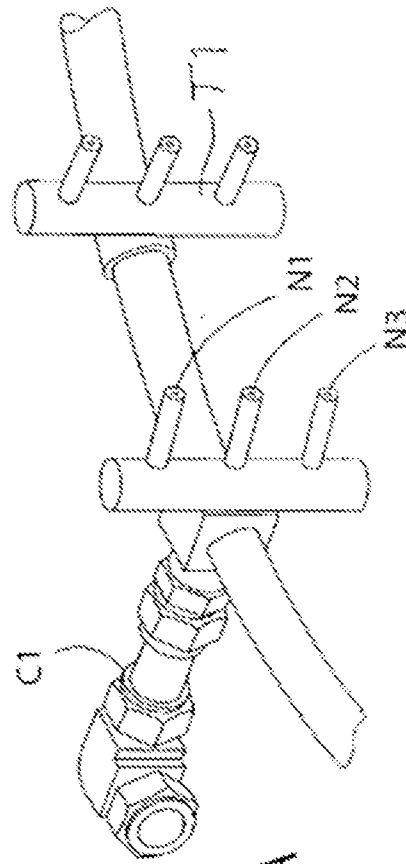


FIG. 6A

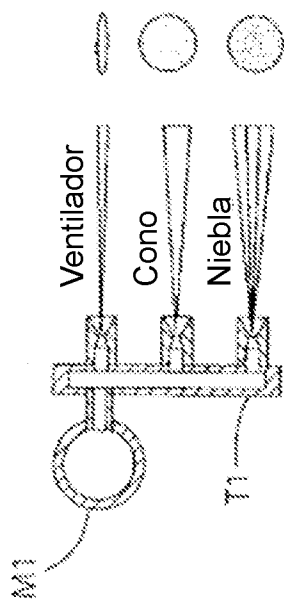


FIG. 7A

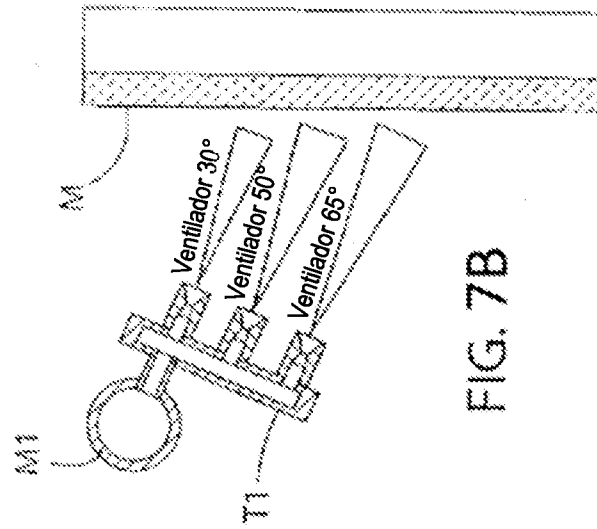


FIG. 7B

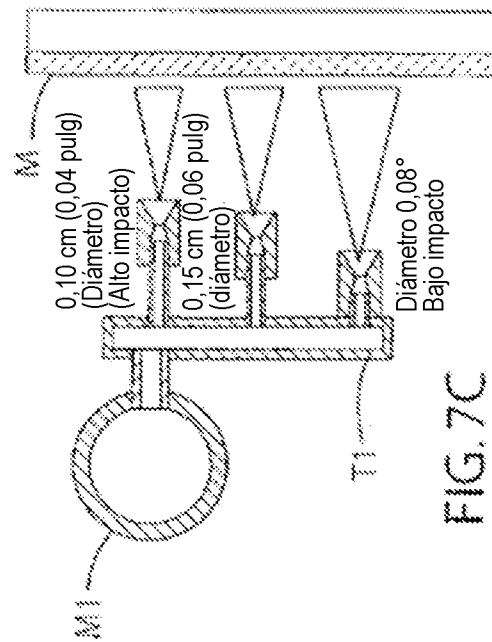
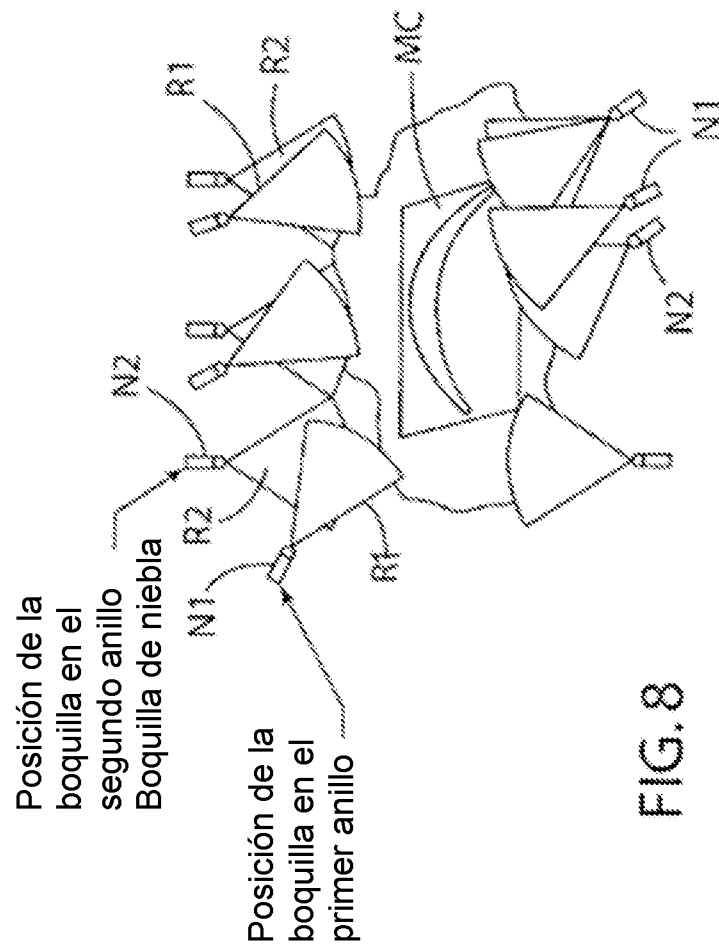


FIG. 7C



Estructura del grano (1X)

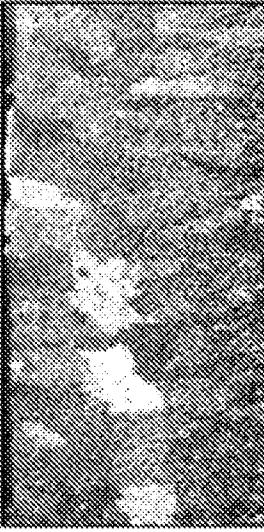
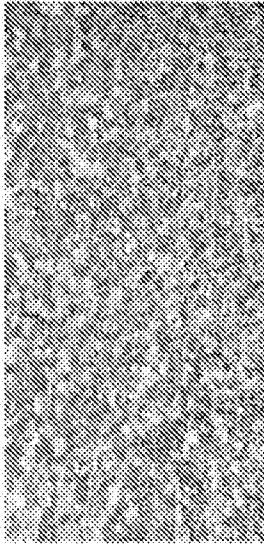


FIG. 9

FIG. 10

Microestructura (50X)

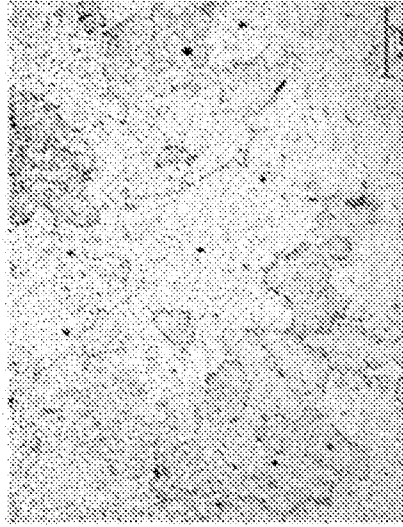
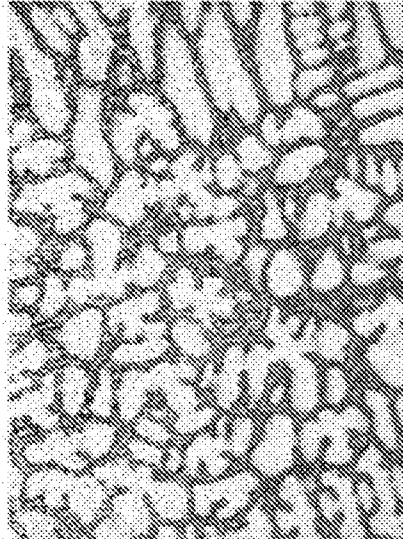
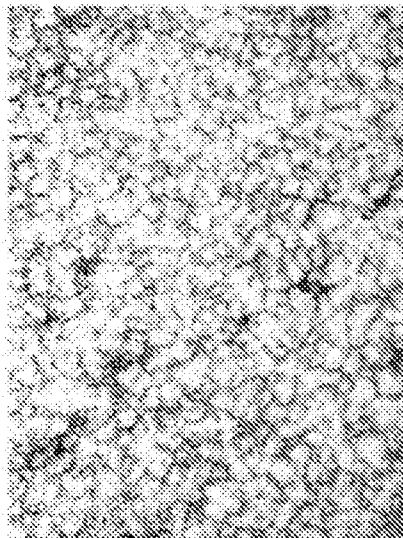


FIG. 11A

FIG. 11B

FIG. 11C

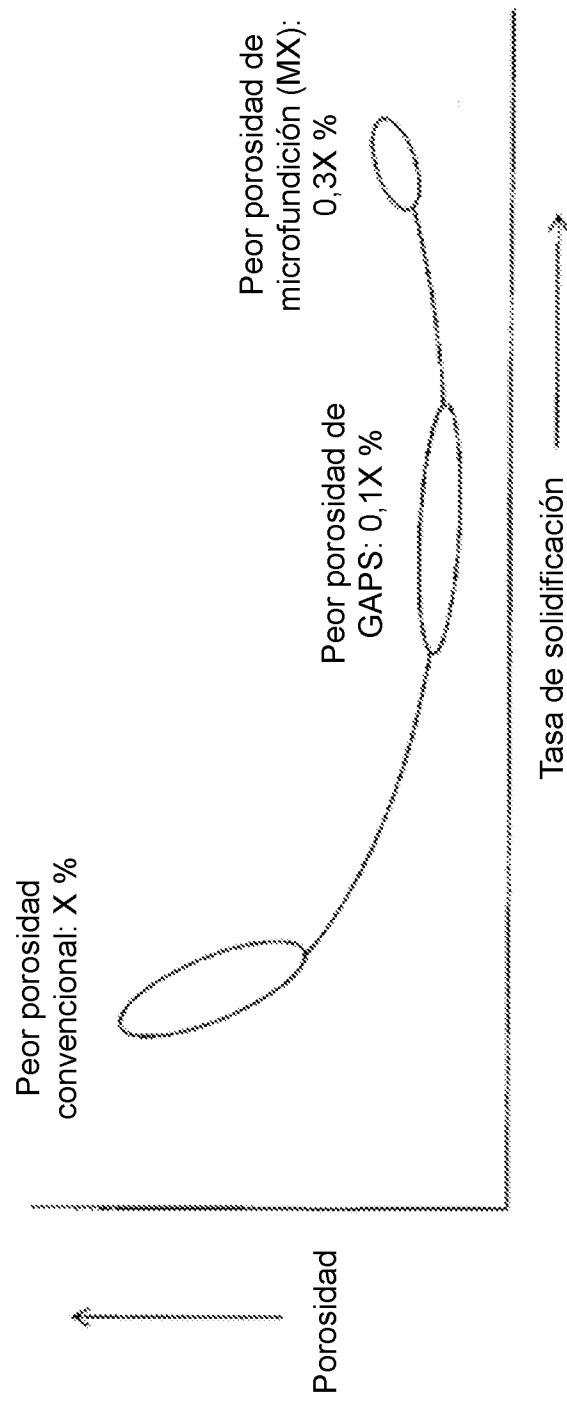
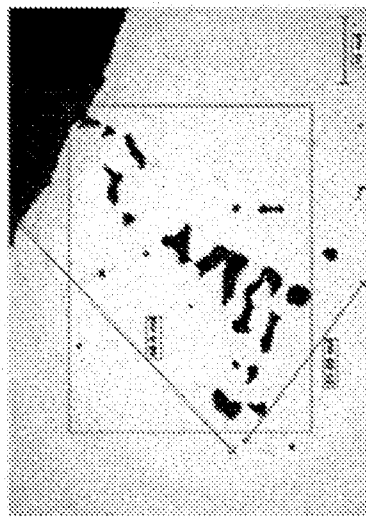


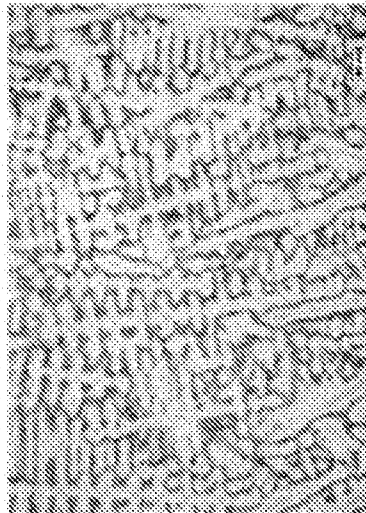
FIG. 12



Producción

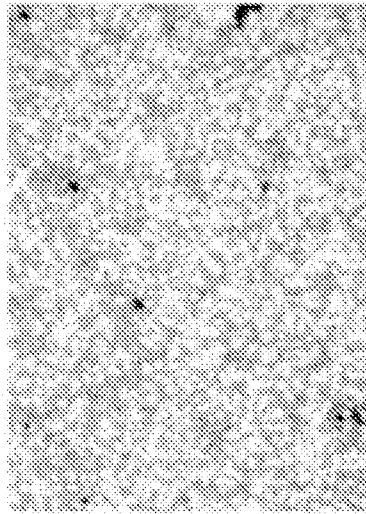
Porosidad dendrítica

FIG. 13A



GAPS

FIG. 13B



MX

Porosidad dispersa

FIG. 13C

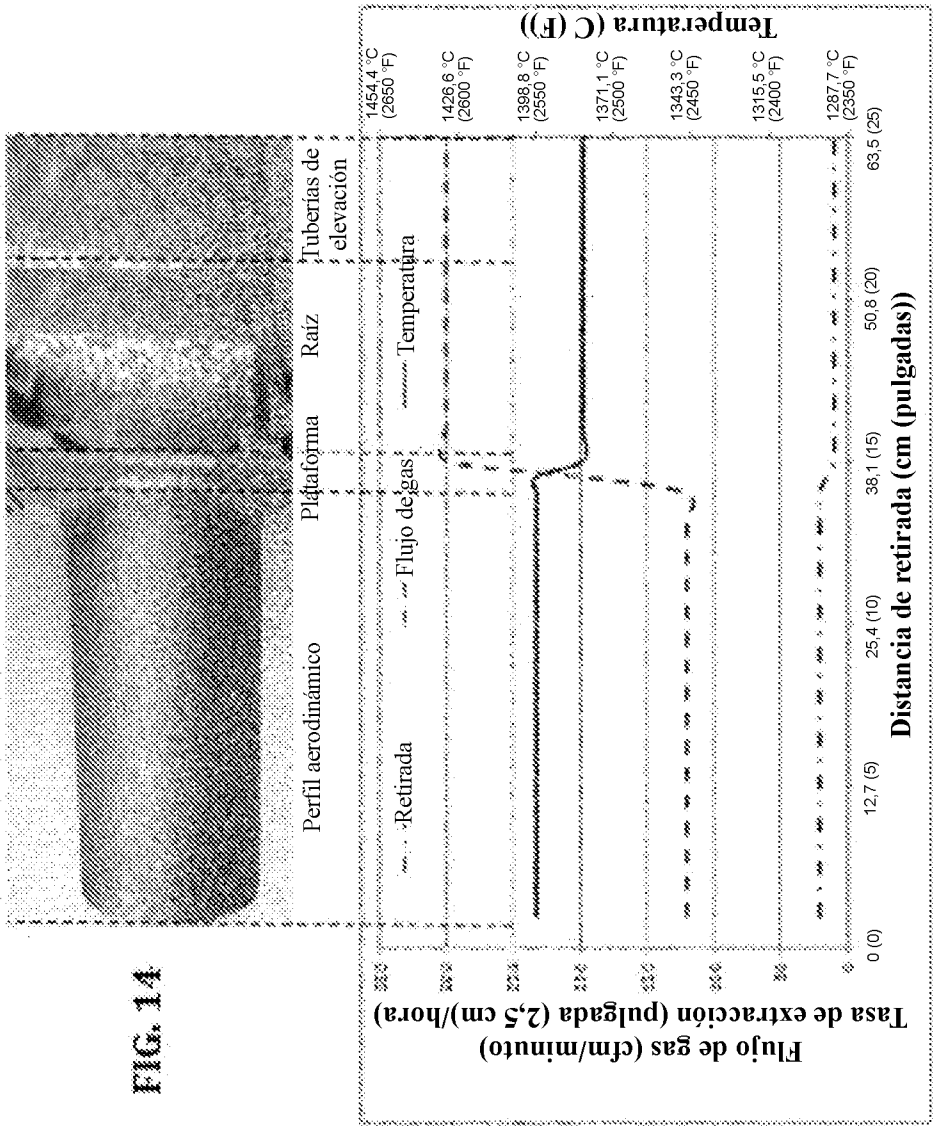


FIG. 14 A Perfil de los parámetros de fundición

FIG. 15

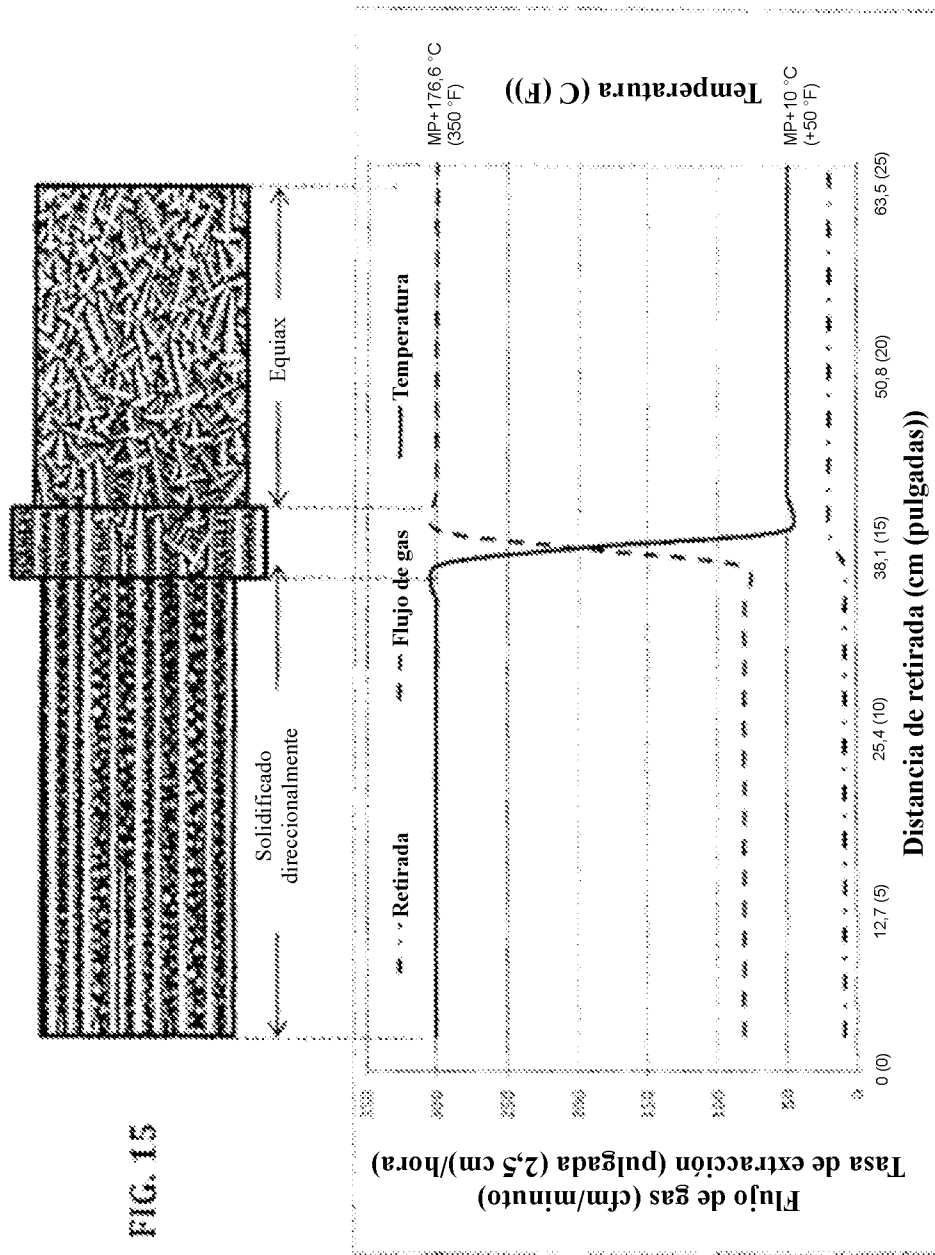


FIG. 15 A