

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 769 777**

51 Int. Cl.:

**B22F 1/00** (2006.01)

**B22F 9/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.12.2014 PCT/EP2014/078849**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **25.06.2015 WO15092008**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.12.2014 E 14821630 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.12.2019 EP 3083107**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento para la fusión por zona flotante de un material y para la atomización del material fundido para producir polvo**

30 Prioridad:

**20.12.2013 DE 102013022096**

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

**29.06.2020**

73 Titular/es:

**NANOVAL GMBH & CO. KG (100.0%)  
Kienhorststrasse 61-65  
13403 Berlin, DE**

72 Inventor/es:

**GERKING, LÜDER;  
GERKING, CHRISTIAN;  
STOBİK, MARTIN y  
HEINZ, RICO**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 769 777 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**

Dispositivo y procedimiento para la fusión por zona flotante de un material y para la atomización del material fundido para producir polvo

5 La invención se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para la fusión por zona flotante de un material y para la atomización del material fundido para producir polvo, en particular para la producción de polvo de metal o de cerámica.

10 En muchos sectores de la técnica se emplean polvos de metal. De este modo se generan polvos de metal en el procedimiento de fundición por inyección de polvo (MIM) o también en los procedimientos generativos, también llamados procedimientos aditivos, como sinterización/fusión por láser y fusión por haz electrónico y pueden fundirse para formar estructuras tridimensionales complejas. Con frecuencia se requieren polvos de metal con tamaños de grano en el rango de micrómetros. A este respecto, para muchas aplicaciones es de gran importancia que el tamaño de grano del polvo de metal no supere un tamaño de grano máximo, o que un rango de fluctuación de una distribución de tamaño de grano estática del polvo fabricado sea lo más pequeño posible, que el tamaño de grano se desvíe lo menos posible de un tamaño de grano deseado.

20 Por el documento de patente DE10340606B4 se sabe cómo fundir metal en un crisol y mediante una tobera Laval atomizarlo para formar polvo de metal. A este respecto es de decisiva importancia, blindar térmicamente la boquilla de fusión, con la que se introduce en la tobera el metal fundido en el crisol, frente al gas de atomización, dado que la masa fundida de lo contrario se enfriaría demasiado, lo que empeora considerablemente la calidad del polvo generado (forma de grano, tamaño de grano, rango de distribución de tamaño de grano) o hace imposible la atomización. En el documento de patente DE10340606B4 se propuso por lo tanto un blindaje correspondiente. Un reto consistía en configurar el blindaje de tal modo que no influya desventajosamente en el perfil de flujo del gas de atomización antes de la entrada en la tobera, ya que también este perfil de flujo tiene una influencia considerable en la calidad del polvo generado.

30 Una desventaja del dispositivo descrito en el documento DE10340606B4 consiste en que en el crisol no puede fundirse ni pulverizarse ningún material, que reaccione químicamente con el recubrimiento de crisol y a consecuencia de esta reacción se contamine. Este problema aparece, por ejemplo, en la fusión por zona flotante de titanio. Por lo tanto, en el documento de patente DE4102101A1 ya se propuso un dispositivo para la fusión por zona flotante de metal. A este respecto una barra de metal se funde mediante una bobina de inducción y a continuación se atomiza asimismo a través de una tobera de atomización. Sin embargo, en el dispositivo según el documento DE4102101A1 aparece el problema de forma mucho más acuciente que en el dispositivo según el documento DE10340606B4 de que la corriente de masa fundida generada en la fundición de la barra se enfría de forma considerable mediante el gas de atomización.

40 Para evitar este problema en el dispositivo según el documento DE4102101A1 se propone un tipo de atomización totalmente diferente. Según el cual la tobera presenta una primera abertura, a través de la cual se introduce la corriente de masa fundida en la tobera. El gas de atomización se introduce de nuevo en la tobera a través de una abertura lateral de la tobera distinta de la primera abertura, es decir, en una dirección perpendicular a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través de la tobera. A la tobera llega el gas de atomización con impulso elevado en perpendicular a la corriente de masa fundida y destroza la corriente de masa fundida, de modo que se forman gotas, que a continuación se congelan formando polvo. También en el documento EP1765536B1 se describe el mismo tipo de atomización. Mediante la introducción lateral del gas de atomización en la tobera puede impedirse parcialmente el enfriamiento de la corriente de masa fundida antes de la entrada en la tobera.

50 Sin embargo se ha mostrado que con el tipo de atomización propuesto en los documentos DE4102101A1 y EP1765536B1 a menudo pueden fabricarse solo polvos con un ancho de distribución de tamaño de grano relativamente grande. Un tamaño de grano deseado pueda ajustarse por tanto, en determinadas circunstancias solo con escasa exactitud, de modo que, dado el caso se producen muchos desechos. Por ello pueden aumentarse los costes de producción.

55 La presente invención se basa por consiguiente en el objetivo de crear un dispositivo y un procedimiento, con los que pueda pulverizarse la mayor pluralidad posible de materiales, en donde un tamaño de grano y la distribución de tamaño de grano del polvo fabricado deban poder ajustarse con exactitud en la medida de lo posible.

60 Este objetivo se consigue mediante un dispositivo y un procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones independientes. Formas de realización especiales se describen en las reivindicaciones dependientes.

Se propone por tanto un dispositivo para la fusión por zona flotante de un material y para la atomización del material fundido para producir polvo, que comprende:

- 65 una tobera de atomización;
- una bobina de inducción con devanados, que se estrechan al menos por secciones en la dirección hacia la

bobina de inducción; y  
 una barra de material introducida al menos parcialmente en la bobina de inducción;  
 en donde la bobina de inducción está diseñada para fundir el material de la barra de material con el fin de  
 generar una corriente de masa fundida; y en donde la bobina de inducción y la tobera de atomización están  
 5 dispuestas de tal modo que la corriente de masa fundida para la atomización de la corriente de masa fundida  
 mediante un gas de atomización, que puede introducirse en la tobera de atomización, puede introducirse en la  
 tobera de atomización a través de una primera abertura de la tobera de atomización.

La tobera de atomización está configurada de tal modo que el gas de atomización solo puede introducirse o se  
 10 introduce en la tobera de atomización a través de la primera abertura mencionada de la tobera de atomización.  
 Además, la tobera de atomización está diseñada para acelerar el gas de atomización en una dirección paralela a la  
 corriente de masa fundida, preferentemente paralela a una dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través  
 de la tobera de atomización, al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización. La barra de material y la  
 15 bobina de inducción están dispuestas además de tal modo que la corriente de masa fundida antes de la entrada de  
 la corriente de masa fundida en la tobera de atomización, es decir, normalmente en una zona entre un extremo de la  
 barra de material y de la tobera de atomización dirigido a la tobera de atomización, puede calentarse o se calienta  
 por inducción mediante la bobina de inducción. Preferentemente la bobina de inducción, en particular en su extremo  
 20 dirigido a la tobera de atomización, está configurada de tal modo que la corriente de masa fundida allí, donde fluye  
 libremente, puede calentarse o se calienta por inducción de tal modo que no se enfría. Por ejemplo se calienta de tal  
 modo que contiene una temperatura mínima necesaria para el proceso de atomización. En la zona en la que la  
 corriente de masa fundida fluye libremente, es decir, normalmente entre el extremo de la barra de material y de la  
 tobera de atomización dirigido a la tobera de atomización, es donde la corriente de masa fundida está más expuesta  
 al gas de atomización, cercándola por todos los lados y circulando libremente alrededor.

25 Se propone además un procedimiento para la producción de polvo mediante fusión por zona flotante de un material y  
 mediante atomización del material fundido, que comprende las etapas de:

introducir al menos parcialmente una barra de material en una bobina de inducción que disminuye a modo de  
 cono al menos por secciones;  
 30 aplicar a la bobina de inducción una tensión alterna para fundir la barra de material y para generar una corriente  
 de masa fundida;  
 introducir la corriente de masa fundida en una tobera de atomización a través de una primera abertura de la  
 tobera de atomización; e  
 35 introducir un gas de atomización en la tobera de atomización y atomizar la corriente de masa fundida mediante el  
 gas de atomización;  
 en donde el gas de atomización se introduce solo a través de la primera abertura de la tobera de atomización en  
 la tobera de atomización;  
 en donde el gas de atomización que va a introducirse y/o introducido a través de la primera abertura en la tobera  
 40 de atomización se acelera en una dirección en paralelo a una dirección de flujo de la corriente de masa fundida,  
 preferentemente en paralelo a una dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través de la tobera de  
 atomización, al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización, de modo que la corriente de masa  
 fundida se divide o incluso estalla y se genera polvo con un tamaño de grano en el rango de micrómetros y/o en  
 el intervalo de submicrómetros; y  
 45 en donde el chorro de masa fundida se calienta por inducción antes de la entrada del chorro de masa fundida en  
 la tobera de atomización mediante la bobina de inducción.

La tobera de atomización, la bobina de inducción y la barra de material para simplificar también se llaman en lo  
 sucesivo simplemente tobera, bobina y barra. Es decir todo el gas de atomización o esencialmente todo el gas de  
 50 atomización determinado para pulverizar la masa fundida se introduce en la tobera a través de la misma primera  
 abertura de la tobera como la corriente de masa fundida. La primera abertura de la tobera habitualmente está  
 dirigida hacia la bobina y hacia la barra. A través de una segunda abertura de la tobera salen de nuevo de la tobera  
 normalmente el gas de atomización y la corriente de masa fundida totalmente o parcialmente pulverizada. La tobera  
 no presenta por lo tanto preferentemente, además de la primera y la segunda abertura ninguna abertura adicional,  
 en particular ninguna abertura lateral para la introducción de gas en perpendicular o esencialmente en perpendicular  
 55 al eje de tobera, como es el caso, por ejemplo en los dispositivos según los documentos DE4102101A1 y  
 EP1765536B1.

Se ha mostrado que con el dispositivo propuesto en este caso y con el procedimiento propuesto en este caso  
 60 pueden pulverizarse una pluralidad de materiales diferentes en zona flotante con muy buenos resultados para la  
 producción de polvo. Por tanto pueden fabricarse polvos con un ancho de distribución de tamaño de grano estrecho,  
 en donde el diámetro y distribución de grano deseado puede ajustarse adecuadamente mediante una cantidad de  
 parámetros de proceso y/o parámetros de dispositivo. Una ventaja esencial consiste en que también pueden  
 atomizarse materiales que no pueden fundirse en un crisol, porque el material que va a pulverizarse a chorro se  
 funde a temperaturas más altas que el material de crisol o reacciona con este y de este modo se contamina.  
 65 Mediante el calentamiento de la corriente de masa fundida mediante la bobina se impide de manera efectiva el  
 enfriamiento o congelación de la corriente de masa fundida antes de la atomización.

- Normalmente la barra de material, la bobina y la tobera de atomización están orientadas a lo largo de una dirección vertical, a lo largo de la cual actúa la gravedad. La corriente de masa fundida cae entonces por tanto bajo la influencia de la gravedad o al menos también bajo la influencia de la gravedad a través de la tobera de atomización.
- 5 La barra, la bobina y la tobera pueden presentar en cada caso una simetría cilíndrica o aproximadamente una simetría cilíndrica, en donde la barra, la bobina y la tobera están dispuestas entonces típicamente de tal modo que sus ejes de simetría están dispuestos en las mismas rectas. La barra, la bobina y la tobera pueden presentar sin embargo fundamentalmente cualquier otra forma de sección transversal. Por ejemplo la tobera puede tener una sección transversal en forma de hendidura, rectangular, ovalado o redonda. Igualmente también la barra puede tener una sección transversal redonda, ovalada, o poligonal. La barra puede estar configurada también en forma de placa. Las formas de la bobina y la tobera han de adaptarse entonces de forma correspondiente a la forma de placa de la barra.
- 10
- La bobina presenta habitualmente al menos tres devanados, preferentemente entre tres y seis devanados. Preferentemente las dimensiones de la bobina y de la barra deberían estar adaptadas unas a otras, de modo que para la fusión de la barra pueda realizarse una transmisión de energía eficiente de la bobina a la barra. Preferentemente a la bobina se aplica una tensión alterna, que se sitúa aproximadamente entre 50 kHz y 200 kHz, preferentemente entre 100 kHz y 150 kHz. La bobina se hace funcionar para la fusión de la barra en función del material de la barra habitualmente con una potencia entre 10 y 150 kW.
- 15
- Un área de sección transversal de la tobera puede disminuir a lo largo del eje de tobera en la dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través de la tobera de manera continua o al menos por secciones. Por ejemplo, el área de sección transversal de la tobera puede disminuir lo largo del eje de tobera en la dirección de flujo linealmente o de forma más intensa que linealmente. La tobera está configurada como tobera Laval.
- 20
- La tobera Laval puede tener entonces un contorno que sale alejándose radialmente del eje de la tobera Laval, de modo que el flujo se guía desde el estado de entorno en reposo con respecto al gas acelerado a través de la tobera Laval ya a una gran distancia respecto al eje de la tobera Laval. Un diámetro del contorno de la tobera Laval puede ascender, por ejemplo, en la zona de la primera abertura de la tobera de aproximadamente 0,5 veces hasta el triple de diámetro de bobina, preferentemente 0,8 veces hasta el doble. El diámetro de bobina citado puede ser el diámetro de bobina en el extremo de la bobina apartado de la tobera o en el extremo de la bobina dirigido a la tobera.
- 25
- Una variante es la denominada tobera de dos etapas, en la que dos contornos de tobera curvados de manera diferente se convierten el uno en el otro de modo que se forma un canto anular en un plano en perpendicular al eje de tobera.
- 30
- El dispositivo presenta normalmente un dispositivo de elevación y de descenso para sujetar, elevar y hacer descender la barra de material. Para mantener aproximadamente constante la posición del extremo de la barra dirigido a la tobera, en el que la barra se funde principalmente, durante la realización del procedimiento, la barra, por ejemplo, se guía continuamente hacia la bobina. Para que la fusión de la barra se realice de la manera más uniforme posible, el dispositivo de elevación y descenso se diseña preferentemente de manera adicional para girar la barra alrededor del eje de barra, por ejemplo con una velocidad de giro de al menos  $1 \text{ min}^{-1}$ .
- 35
- Cuando en lo sucesivo se hable de barra de material, quiere decirse la barra de material, en tanto que está sólida y todavía no se ha fundido. La masa fundida o la corriente de masa fundida, en particular con respecto a mediciones de distancia entre la barra y otros componentes del dispositivo, no debe entenderse como parte de la barra de material.
- 40
- El material, del que está formado la barra de material, puede comprender metal o cerámica. El material de la barra de material, del que se fabrica el polvo, puede contener, por ejemplo uno de los siguientes metales o una aleación de uno o varios de los metales siguientes: titanio, aluminio, hierro, circonio, hafnio, vanadio, niobio, tántalo, cromo, molibdeno, wolframio, renio, níquel, cobalto.
- 45
- Con el procedimiento propuesto puede fabricarse polvo con un diámetro de grano medio referido a la masa de menos de  $50 \mu\text{m}$ . El diámetro de grano medio referido a la masa puede ascender también a menos de  $10 \mu\text{m}$  o menos de  $1 \mu\text{m}$ .
- 50
- Un ancho de la distribución de tamaño de grano del polvo fabricado puede caracterizarse por el diámetro  $d_{84}$  y  $d_{50}$ . Estos están definidos de la manera siguiente: 84 por ciento del polvo (porcentaje en peso) tienen un diámetro de grano, que es inferior a  $d_{84}$  y 50 por ciento del polvo (porcentaje en peso) tienen un diámetro de grano, que es inferior a  $d_{50}$ . Con el procedimiento propuesto pueden fabricarse, por ejemplo, polvos, en los que se cumple:  $d_{84}/d_{50} \leq 2.8$ , preferentemente  $d_{84}/d_{50} \leq 2.3$ , especialmente  $d_{84}/d_{50} \leq 1.8$ .
- 55
- Para alcanzar una distribución de tamaño de grano especialmente estrecha, un diámetro interno  $d_{\text{min}}$  mínimo de la tobera de atomización puede ser menor de 7 mm, preferentemente menor de 5 mm, de manera especialmente
- 60
- 65

preferente menor de 3 mm. A este respecto el diámetro interno ha de determinarse en cada caso perpendicular al eje de tobera o perpendicular a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través de la tobera. Normalmente el diámetro interno mínimo aparece en la posición a lo largo del eje de tobera, en la que la tobera o el tubo de tobera presenta el área de sección transversal más pequeña. El diámetro interno se determina preferentemente a lo largo de una recta, que discurre a través del punto central de la sección transversal.

Para la caracterización del dispositivo puede servir un plano, que corta en perpendicular el eje de tobera o la dirección de flujo de la corriente de masa fundida a través de la tobera, y concretamente en aquella posición a lo largo del eje de tobera o a lo largo de la dirección de flujo, en la que el área de sección transversal de la tobera de atomización, en particular por tanto el área de sección transversal del canal formado por la tobera es mínima. Para simplificar, este plano se designa además también como el plano de la sección transversal más estrecha.

Pueden tomarse medidas constructivas, para alimentar la masa fundida de la tobera con una cercanía suficiente, de modo que pueda ser arrastrada de la forma más adecuada posible por el flujo de gas del gas de atomización de la manera descrita. Debido a la cercanía necesaria de la bobina con respecto a la barra de material precisamente en la zona más inferior, donde la fusión se realiza por completo, para que no queden restos de barra de manera asimétrica o descentrada, es decir, donde debería evitarse a toda costa un enfriamiento y congelación de la corriente de masa fundida en el camino hacia la tobera debido al enfriamiento mediante el flujo de gas generalmente frío por razones energéticas, que arrastra y acelera la corriente de masa fundida, resulta una distancia máxima preferente de la zona de fusión de la tobera. Preferentemente, en este camino hasta la sección transversal más estrecha de la tobera se realiza un aumento de la presión en el interior del chorro de masa fundida debido a las tensiones de cizallamiento entre el flujo de gas más rápido y él, mientras que en otros procedimientos un gas frío está en contacto solo relativamente de manera breve con la masa fundida, dado que no tiene una dirección común con esta, ni antes ni después de este contacto - en todo caso de modo estocástico, es decir en partes aleatorias y además tampoco necesita un tiempo de contacto prolongado, porque el gas ya posee la energía cinética elevada, y por consiguiente no se recorre ningún trayecto común más largo con enfriamiento posible e involuntario.

La barra de material y la tobera de atomización pueden disponerse por ello de tal modo que una distancia mínima  $L$  entre la barra de material y el plano de la sección transversal más estrecha es menor de  $7 \cdot d_{\min}$ , menor de  $6 \cdot d_{\min}$ , menor de  $5 \cdot d_{\min}$  o menor de  $4 \cdot d_{\min}$ . Por ejemplo, de este modo puede contrarrestarse un enfriamiento demasiado intenso de la corriente de masa fundida antes de la atomización. Normalmente la barra en un extremo de la barra, que está dirigido a la tobera, tiene aproximadamente una forma de cono.  $L$  es entonces habitualmente la distancia de la punta de cono del plano de la sección transversal más estrecha.

La tobera de atomización y la bobina de inducción están realizadas como componentes independientes. La bobina de inducción por tanto no está integrada entonces en la tobera. En la dirección de flujo la bobina en esta forma de realización está dispuesta normalmente delante o fuera de la tobera. El dispositivo es con ello de manera especialmente flexible. Por ejemplo la bobina puede cambiarse fácilmente o ajustarse con respecto a la tobera. Además, puede evitarse de manera más efectiva que la tobera mediante la bobina se caliente demasiado o incluso se funde.

Para evitar un enfriamiento demasiado intenso o incluso una congelación de la corriente de masa fundida antes de la atomización y respaldar el flujo de la corriente de masa fundida, la bobina de inducción y la tobera de atomización están dispuestos de tal modo que una distancia mínima  $a_{\min}$  entre la bobina de inducción y el plano de la sección transversal más estrecha es menor de  $4 \cdot d_{\min}$ , menor de  $3 \cdot d_{\min}$  o menor de  $2 \cdot d_{\min}$ . Preferentemente la distancia  $a_{\min}$  se determina a este respecto en una dirección en paralelo al eje de tobera o en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida. La bobina puede llegar también directamente hasta la tobera o estar en contacto con la tobera. En este caso la tobera debería estar formada de un material no conductor.

Para impedir en la medida de lo posible un acoplamiento electromagnético de la tobera en la bobina y un calentamiento inductivo de la tobera mediante la bobina, la tobera puede estar formada de un material, que o es un conductor eléctrico muy bueno o un conductor eléctrico muy malo. Si el material de tobera es un conductor muy bueno, entonces apenas aparecen pérdidas óhmicas, que se disipan en forma de calor en la tobera. Si por el contrario el material de tobera es un mal conductor, entonces no se induce ninguna o prácticamente ninguna corriente de Foucault en la tobera, lo que asimismo no produce o apenas produce pérdidas óhmicas. Para una resistencia eléctrica específica del material de tobera se aplica por lo tanto preferentemente  $\rho \leq 0,0210^{-6} \Omega\text{m}$  o  $\rho \geq 10^{-2} \Omega\text{m}$ .

Una forma de realización adicional especial del dispositivo está caracterizada por una cámara de alta presión, una cámara de atomización conectada fluidicamente con la cámara de alta presión a través de la tobera de atomización, primeros medios de regulación de presión para introducir el gas de atomización en la cámara de alta presión y para regular una primera presión del gas  $p_1$  en la cámara de alta presión, así como segundos medios de regulación de presión para regular una segunda presión del gas  $p_2$  en la cámara de atomización, en donde los primeros y los segundos medios de regulación de presión están diseñados para ajustar las presiones  $p_1$  y  $p_2$  para la aceleración del gas de atomización en una dirección en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida de tal modo que se cumple:  $p_1/p_2 > 1.8$  y  $p_1 > 10$  bar. La primera presión del gas  $p_1$  es mayor por tanto que la segunda presión

del gas  $p_2$ .

Normalmente la segunda presión del gas  $p_2$  en la cámara de atomización asciende a aproximadamente 1 bar. Mediante el ajuste de las presiones del gas  $p_1$  y  $p_2$  puede influirse en la aceleración del gas de atomización y regularse delante de la tobera, en el interior de la tobera y detrás de la tobera. De este modo puede influirse también en las tensiones de cizallamiento transmitidas por el gas de atomización a la corriente de masa fundida, y dado el caso, el grado de centrado y expansión de la corriente de masa fundida, en particular también ya antes de la entrada de la corriente de masa fundida en la tobera y/o antes de la atomización de la corriente de masa fundida. Los primeros y segundos medios de regulación de presión pueden comprender, por ejemplo, en cada caso una o varias bombas, cables, toberas, válvulas, un compresor y/o tanque de gas de alta presión.

Es especialmente ventajoso calentar la barra de material sobre todo en su extremo dirigido a la tobera, normalmente por tanto en el extremo inferior, de la manera más efectiva posible y de la manera más uniforme posible, dado que en este caso tiene lugar la fusión de la barra. También el extremo de la barra de material dirigido a la tobera debería estar dispuesto dentro de la bobina, es decir preferentemente no debería sobresalir en la dirección de flujo del extremo de la bobina dirigido a la tobera.

Además es ventajoso, cuando al menos uno de los devanados de la bobina de inducción, que está dispuesto en la zona del extremo de la barra de material dirigido a la tobera, para generar un campo electromagnético lo más simétrico posible en esta zona con respecto al eje de barra discurre al menos por secciones perpendicular al eje de barra. Preferentemente al menos el último bobinado de la bobina dirigido a la tobera discurre al menos por secciones perpendicular al eje de barra o a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida. Por ejemplo, al menos el último devanado puede rodear por completo o casi por completo el eje de barra o una prolongación imaginaria del eje de barra en un plano en perpendicular o casi en perpendicular al eje de barra.

De este modo al menos uno de los devanados, en particular al menos el último devanado, puede estar configurado como conductor anular interrumpido eléctricamente en un punto, preferentemente como conductor anular casi cerrado. La interrupción puede estar realizada como entrehierro o mediante un material aislante. El término conductor anular debe incluir no solamente conductores en forma de un anillo. Más bien debe comprender una pluralidad de formas. Es decisivo que el conductor anular a lo largo de la gran parte de su longitud discurra esencialmente en un plano y forme una espira casi cerrada. Por ejemplo, el conductor anular puede discurrir en al menos 50 por ciento, en al menos 70 por ciento o en al menos 90 por ciento en un plano en perpendicular o esencialmente en perpendicular al eje de barra o en perpendicular o esencialmente en perpendicular a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida. El conductor anular puede rodear el eje de barra o una prolongación imaginaria del eje de barra en al menos 180 grados, en al menos 225 grados, en al menos 270 grados, en al menos 315 grados o en casi 360 grados en perpendicular o casi en perpendicular al eje de barra. El conductor anular puede estar configurado en gran medida circular, ovalado, rectangular o poligonal. Puede tener aproximadamente una forma de herradura. El conductor anular no debe tener una forma simétrica. Preferentemente, sin embargo el conductor anular está dispuesto en simetría rotacional o casi en simetría rotacional con respecto al eje de barra o hacia la dirección de flujo de la corriente de masa fundida. De este modo el conductor anular por ejemplo puede estar configurado aproximadamente en forma circular.

En una forma de realización especial la bobina puede presentar al menos dos conductores anulares del tipo descrito. Los al menos dos conductores anulares pueden estar formados por el mismo material conductor, por ejemplo de cobre, en donde los al menos dos conductores anulares pueden estar conectados en paralelo eléctricamente. Para que los conductores anulares conectados en paralelo a en cada caso tengan una resistencia eléctrica aproximadamente igual y/o generen a lo largo del eje de barra una distribución de campo lo más homogénea posible, los conductores anulares pueden tener secciones transversales configuradas distintas con perímetro diferente y/o tener diferentes distancias a lo largo del eje de barra. La sección transversal es la sección transversal del tubo conductor o del hilo conductor del conductor anular. Por ejemplo un primer conductor anular y un segundo conductor anular pueden estar conectados en paralelo, en donde el primer conductor anular tiene un perímetro mayor que el segundo conductor anular. Por ejemplo, una distancia del primer conductor anular con respecto a la tobera es mayor que una distancia del conductor anular con respecto a la tobera. En este caso, la sección transversal del primer conductor anular puede estar aumentada con respecto a la sección transversal del segundo conductor anular.

La bobina de inducción puede estar arrollada al menos por secciones en forma de espiral, y en concreto preferentemente de manera continua con una pendiente distinta de cero con respecto a una dirección en paralelo al eje de barra, discurrendo los devanados en esta sección sobre la superficie lateral de un cono, que es simétrico al eje de barra. Con un plano que es perpendicular al eje de barra, los devanados o devanados de la bobina pueden presentar por ejemplo por secciones o de manera continua un ángulo de más de 5 grados, de más de 10 grados o más de 15 grados.

Para enfriar la bobina de inducción un conductor que forma la bobina de inducción puede estar configurado como tubo hueco para guiar un líquido de refrigeración. Una sección transversal del tubo hueco puede ser circular, ovalada o cuadrangular. El tubo hueco puede estar configurado como tubo hueco doble, que comprende dos cámaras

huecas separadas, por ejemplo para el flujo de ida y el flujo de vuelta.

Para la fusión y atomización de materiales eléctricamente no conductores como cerámicas, como variante del calentamiento entre la barra y la bobina puede estar dispuesta una pantalla que sigue un contorno de la barra, por ejemplo con simetría rotacional, y abierta hacia la tobera. Preferentemente la pantalla está formada por un material resistente a las altas temperaturas y con acoplamiento inductivo, por ejemplo de platino. La pantalla se calienta normalmente incluso por inducción y emite calor a la barra mediante radiación de calor.

Como realimentación de polvo residual inservible, polvo de material y virutas la barra misma puede estar configurada como crisol. Para ello la barra puede poseer cavidades adecuadas que pueden rellenarse. Tal cavidad puede ser, por ejemplo, una escotadura cilíndrica en el núcleo, en el que puede cargarse el material residual.

Pueden fabricarse polvos con una distribución de tamaño de grano especialmente estrecha al acelerarse el gas de atomización al menos a la velocidad del sonido del gas de atomización en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida a lo largo de un tramo de aceleración comparativamente corto con una longitud  $L_B$ . Por ejemplo puede cumplirse:  $L_B \leq 5 \cdot d_{\min}$ , en donde  $d_{\min}$  es el diámetro mínimo de la tobera de atomización ya mencionado perpendicular al eje de tobera. Paralelo a la dirección de flujo la velocidad  $v$  del gas de atomización varía por tanto al recorrer un trayecto con la longitud  $L_B$  en una cantidad  $\Delta v$ , en donde se cumple por ejemplo:  $\Delta v \geq 0.9v_0$ , en donde  $v_0$  va a designar la velocidad del sonido del gas de atomización.

El dispositivo propuesto en este caso puede presentar adicionalmente a la tobera de atomización descrita anteriormente también al menos una tobera adicional, que está dispuesta alineada con la tobera de atomización, de modo que la corriente de masa fundida puede guiarse o se guía también a través de la tobera adicional. La tobera adicional puede estar configurada de tal modo que acelera un gas introducido con la corriente de masa fundida en la tobera adicional en una dirección en paralelo a la corriente de masa fundida al menos hasta 0,5 veces la velocidad del sonido del gas introducido en la tobera adicional, y de manera preferentemente laminar. Por ejemplo, la tobera adicional puede presentar una sección transversal que disminuye en la dirección de flujo de la corriente de masa fundida de forma monótona o estrictamente monótona. Por ejemplo, también la tobera adicional puede estar configurada como tobera Laval. Las dimensiones de la tobera adicional pueden desviarse de las de la tobera de atomización. Por ejemplo, una sección transversal mínima de la tobera adicional puede ser mayor que la sección transversal mínima de la tobera de atomización.

Preferentemente la tobera adicional está dispuesta entre la barra de material y la tobera de atomización, es decir en la dirección de flujo de la corriente de masa fundida delante de la tobera de atomización. Puede servir en particular para acelerar el gas introducido en la tobera adicional ya antes de su entrada en la tobera de atomización. Como alternativa o adicionalmente la tobera adicional puede centrar y/o expandir y acelerar la corriente de masa fundida ya antes de su entrada en la tobera de atomización. Sin embargo son concebibles igualmente disposiciones, en las que la tobera adicional está dispuesta en la dirección de flujo de la corriente de masa fundida detrás de la tobera de atomización.

En los dibujos se representan ejemplos de realización de la invención y se explican con más detalle mediante la siguiente descripción. Muestran:

Fig. 1 esquemáticamente una representación en sección de un dispositivo de acuerdo con la invención para fundir un material y para atomizar el material formando polvo, en donde el dispositivo comprende una barra de material, una bobina de inducción y una tobera de atomización;

Fig. 2 esquemáticamente una representación ampliada de la barra de material, de la bobina de inducción y de la tobera de atomización de la figura 1;

Fig. 3 esquemáticamente una primera forma de realización especial de la bobina de inducción mostrada en las figuras 1 y 2;

Fig. 4 esquemáticamente una segunda forma de realización especial de la bobina de inducción mostrada en las figuras 1 y 2;

Fig. 5 esquemáticamente una tercera forma de realización especial de la bobina de inducción mostrada en las figuras 1 y 2;

Fig. 6 esquemáticamente una cuarta forma de realización especial de la bobina de inducción mostrada en las figuras 1 y 2;

Fig. 7 esquemáticamente una vista superior de la forma de realización de la bobina de inducción de acuerdo con la figura. 6; Fig. 8 esquemáticamente una forma de realización especial para materiales sin acoplamiento inductivo como por ejemplo cerámica; y

Fig. 9 esquemáticamente una forma de realización adicional del dispositivo propuesto, en el que una tobera adicional está dispuesta de manera alineada con la tobera de atomización.

Fig. 1 muestra esquemáticamente una representación en sección de un ejemplo de realización de un dispositivo de acuerdo con la invención 1 para la fusión de zona flotante de un material, en este caso titanio, y para la atomización del material para formar polvo. El dispositivo 1 comprende un contenedor 2, en el que están dispuestas una barra de material 3, una bobina de inducción 4 y una tobera de atomización 5. La barra 3, la bobina 4 y la tobera 5 están

orientadas en cada caso en simetría cilíndrica o aproximadamente en simetría cilíndrica y a lo largo de un eje vertical 9. Un eje de simetría de la barra 3, un eje de simetría de la bobina 4 y un eje de simetría de la tobera 5 coinciden en cada caso con el eje 9. Este discurre en paralelo a una dirección z 10, a lo largo de la cual actúa la gravedad. En perpendicular a la dirección z 10 discurre una dirección x o dirección lateral 11. La bobina 4 y la tobera 5 están configuradas como componentes independientes. La bobina 4 está dispuesta por encima de la tobera 5 y distanciada de esta a lo largo de la dirección z 10.

La barra de material 3 está formada en este caso de titanio y se introduce parcialmente en la bobina 4. Un equipo de elevación/descenso 13 está diseñado para sujetar la barra 3 y moverla a lo largo de la dirección positiva y negativa z 10. Además, el equipo de elevación/descenso 13 puede girar la barra 3 con una velocidad de giro de hasta  $200 \text{ min}^{-1}$  alrededor del eje de barra, como se indica mediante la flecha 14. La bobina 4 circunda la barra 3 en su extremo inferior, dirigido a la tobera 5 y la rodea. Una sección transversal de la barra determinada en perpendicular al eje de barra tiene por ejemplo un diámetro de barra 12 de 40 mm. En la zona de los devanados 4a y 4b la bobina 4 tiene un diámetro algo mayor que la barra 3. La bobina 4 está formada en este caso de cobre y presenta una cantidad de devanados 4a-d. En la dirección hacia la tobera 5 los devanados 4a-d se estrechan al menos por secciones. Por ejemplo el primer devanado 4a en el extremo de la bobina 4 apartado de la tobera 5 tiene un diámetro de devanado mayor que el último devanado 4d dirigido a la tobera 5.

Un espacio interior del contenedor 2 está dividido por una pared divisoria 6 en una cámara de alta presión 7 situada por encima de la pared divisoria 6 y una cámara de atomización 8 situada por debajo de la pared divisoria 6, en donde la cámara de alta presión 7 y la cámara de atomización 8 están conectadas fluidicamente a través de la tobera 5. La bobina 4 y la barra de material 3 están dispuestas en la cámara de alta presión 7. Una primera presión de gas  $p_1$  en la cámara de alta presión 7 y una segunda presión de gas  $p_2$  en la cámara de atomización 8 pueden ajustarse a través de primeros medios de regulación de presión 17 y segundos medios de regulación de presión 18. Los primeros medios de regulación de presión comprenden, por ejemplo, un acumulador de gas a alta presión con argón, una línea de alta presión y una válvula de alta presión, a través de la cual el gas argón puede introducirse en la cámara de alta presión 7. Los segundos medios de regulación de presión 18 comprenden por ejemplo una válvula de escape de aire y una línea de escape de aire. En este caso la primera presión de gas  $p_1$  se regula a 15 bar y la segunda presión de gas  $p_2$  a aproximadamente 1 bar, de modo que se cumple aproximadamente  $p_1/p_2 = 15$ .

La bobina 4 se hace funcionar por una fuente de tensión alterna no mostrada en este caso con una tensión alterna de aproximadamente 100 kHz y con una potencia eléctrica de aproximadamente 20 kW. La bobina induce por ello campos alternos magnéticos en la barra 3 eléctricamente conductora. De esta manera la barra 3 se calienta por inducción, de modo que se funde en el extremo de barra 15 inferior dirigido a la tobera 5 al menos en la superficie. Por ello se forma una corriente de masa fundida 16, que fluye hacia abajo en la dirección z.

En la figura. 2 el extremo de barra 15 de la barra 3 dirigido hacia la tobera 5, la bobina 4 y la tobera 5 se muestran en una representación ligeramente aumentada. En este caso y en lo sucesivo las características recurrentes están provistas en cada caso con los mismos números de referencia. La corriente de masa fundida 16 continua generada mediante el calentamiento inductivo de la barra 3 fluye en la dirección z 10 hacia abajo y se introduce en la tobera 5 a través de una primera abertura 20 de la tobera 5 dirigida hacia la bobina 4 y la barra 3. La tobera 5 está configurada como tobera Laval. La forma de la tobera 5 provoca, asociado a la primera diferencia de presión entre la primera presión de gas  $p_1$  en la cámara de alta presión 7 y la segunda presión de gas  $p_2$  en la cámara de atomización 8 una aceleración del gas de atomización en la dirección z 10, en este caso realizado mediante flechas 19. En este caso se acelera gas de atomización 19 en la dirección z 10 y se introduce a través de la primera abertura 20 en la tobera 5. Dado que en particular no es necesario precalentar gas de atomización 19, el procedimiento descrito en este caso puede llevarse a cabo con un consumo energético comparativamente bajo. La tobera 5 está conectada fluidicamente con la cámara de alta presión 7 solo a través de la primera abertura 20. El gas de atomización 19 se introduce en la tobera 5 por tanto exclusivamente a través de la primera abertura 20.

La corriente de masa fundida 16 se arrastra y se centra ahora por la corriente del gas de atomización 19 laminar y acelerada laminarmente en la dirección z 10. La corriente de masa fundida 16 se guía entonces junto con este flujo de gas en aceleración a través de la primera abertura 20 hacia la tobera 5 y atraviesa la tobera 5. Mediante el gas de atomización 19 más rápido se transmiten tensiones de cizallamiento a la masa fundida que fluye más lenta en la dirección z 10. Esta transmisión se realiza de manera análoga a una tensión de cizallamiento de pared inversa en caso de un flujo tubular laminar y provoca en la dirección de flujo una subida de la presión en el interior de la corriente de masa fundida 16. En cambio, en la corriente del gas de atomización 19 cada vez más rápida se realiza una disminución de la presión condicionada por la forma de la tobera Laval 5. Tan pronto como la presión interna de la corriente de masa fundida 16 aumenta demasiado, la corriente de masa fundida 16 revienta y se atomiza en gotitas 21. La corriente de masa fundida 16 o las gotitas 21 entran en la cámara de atomización solo a través de una segunda abertura 22 de la tobera 5. La segunda abertura 22 es la única unión fluidica entre la tobera 5 y la cámara de atomización 8.

Tras el enfriamiento y congelación de las gotitas se forma de este modo, un polvo esférico de distribución estrecha y muy fino del material fundido. En el presente ejemplo de realización descrito se genera un polvo de titanio con un diámetro de grano medio referido a la masa de  $51 \mu\text{m}$ . Para el ancho de la distribución de diámetro de grano del



polvo de titanio generado de este modo se cumple  $d_{84}/d_{50} \leq 2.6$ .

Un parámetro importante para generar un polvo de alta calidad es la sección transversal de tobera mínima, caracterizada por el diámetro interno  $d_{\min}$  mínimo (número de referencia 23) de la tobera de atomización 5. En este caso  $d_{\min}$  asciende a  $a = 6$  mm. En la figura 2 está realizado un plano 24 perpendicular al eje de tobera 9, en el que un área de sección transversal de la tobera es mínima y en el que el diámetro interno de la tobera 5 adopta su valor mínimo  $d_{\min}$ .

Para contrarrestar el enfriamiento o congelación de la corriente de masa fundida 16 antes de la pulverización, es ventajoso acercar la barra 3 lo más cerca posible de la tobera 5. En este caso la barra 3 y la tobera 5 están dispuestas de tal modo que una distancia mínima 25 entre el plano 24 y la barra 3 asciende aproximadamente solo al triple de  $d_{mi}$ , es decir, a alrededor de 18 mm.

La energía mecánica alimentada o que va a alimentarse a la corriente de masa fundida 16 para la atomización se introduce en la corriente de masa fundida 16 preferentemente mediante las tensiones de cizallamiento de un flujo del gas de atomización 19 inicialmente en reposo o esencialmente en reposo y acelerado de forma laminar solo junto con la corriente de masa fundida 16. La tobera 5 está configurada de tal modo que la corriente del gas de atomización 19 permanece laminar hasta la atomización de la corriente de masa fundida 16. La corriente de masa fundida 16 se acelera de este modo ya captada por el flujo mucho más lento del gas de atomización 19, se expande y disminuye a lo largo de la dirección de flujo. La energía necesaria para la atomización puede transmitirse ya a la corriente de masa fundida 16, antes de que esta fluya a través de la tobera 5.

La distancia 25 más corta comparativamente reducida en el dispositivo descrito en este caso entre la barra 3 y el plano 24 de la sección transversal de tobera más estrecha provoca por consiguiente además que el gas de atomización se acelere en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida 16 a lo largo de un tramo de aceleración, que es más corto que la distancia 25 entre la barra 3 y el plano 24, al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización 19. Por tanto, la longitud del tramo de aceleración asciende en este caso en particular a menos del triple de  $d_{\min}$ . El gas de atomización 19 alcanza la velocidad del sonido, cuando pasa el plano 24 de la sección transversal de tobera más estrecha. Una medida efectiva adicional, con la que se impide el enfriamiento o congelación de la corriente de masa fundida 16 antes de la atomización, consiste en acercar la bobina 4 lo más cerca posible de la tobera, de modo que la corriente de masa fundida 16 antes de la entrada en la tobera 5 fluye en la medida de lo posible todavía dentro de la bobina 4 y se rodea o se circunda al menos por el último devanado 4d de la bobina 4. En el ejemplo mostrado en este caso la distancia mínima  $a_{\min}$  (número de referencia 26) entre el extremo de la bobina 4 dirigido a la tobera 5 y el plano 24 de la sección transversal de tobera más estrecha asciende a menos del doble de  $d_{\min}$ , es decir, menos de aproximadamente 12 mm.

La barra 3, la bobina 4 y la tobera 5, como se muestra en la figura 2, están dispuestas de tal modo que la corriente de masa fundida 16 se calienta en una zona entre el extremo de la barra 3 dirigido a la tobera 5 y la tobera 5 o entre el extremo de la barra 3 dirigido a la tobera 5 y el plano 24 de la sección transversal de tobera más estrecha adicionalmente al menos por el último devanado 4d de la bobina 4. Por lo tanto al menos el último devanado 4d a lo largo de la dirección de flujo de la corriente de masa fundida 16 está dispuesto entre el extremo de la barra dirigido a la tobera 5 y la tobera 5. El diámetro de devanado del último devanado 4d es en este caso menor de  $5 \cdot d_{\min}$ . Para impedir al mismo tiempo que la tobera 5 se caliente mediante la bobina 4 que se ha acercado a la tobera 5, la tobera 5 está formada principalmente de un material, cuya resistencia eléctrica específica es por ejemplo mayor de  $2 \cdot 10^{-2} \Omega m$ . La fusión de la barra 3 en su extremo dirigido a la tobera 5 se realiza en la disposición mostrado en la figura 2 de manera especialmente eficiente, porque los devanados 4b-d están orientados en cada caso por secciones en perpendicular al eje de barra 9. Las secciones de devanados contiguos orientadas en cada caso en perpendicular al eje de barra 9 están unidas mediante secciones oblicuas, que en cada caso superan una altura de paso G constante.

Para que el calentamiento inductivo del chorro pueda suceder de manera especialmente efectiva es importante que una tasa de fusión (masa por tiempo), con la que se funde la barra 3, sea suficientemente grande para crear un corriente de masa fundida 16 continua. La tasa de masa fundida debería ascender, por ejemplo, al menos a 0,5 kg por minuto o al menos 1 kg por minuto. La tasa de fusión necesaria para crear una corriente de fusión continua 16 depende naturalmente de las propiedades especiales del material fundido y puede variar de material a material (por ejemplo viscosidad, tensión superficial).

En las figuras 3 a 7 se muestran formas de realización esquemáticamente especiales de la bobina 4.

La figura 3 muestra una forma de realización de la bobina 4, en la que los devanados 4b-d están devanados en especial y discurren sobre la superficie lateral 26 de un cono imaginario, que es simétrico con respecto al eje de barra 9. En el caso de una vuelta completa de 360 grados cada devanado supera a este respecto una altura de paso G. Un diámetro de un conductor o de tubo conductor 27 que forma la bobina 4 está designado con P. Normalmente G es algo mayor que P. Por ejemplo puede cumplirse  $G \geq 1.5P$ . El conductor 27 está configurado para la refrigeración mediante un líquido refrigerante como tubo hueco de cobre. El diámetro externo P de este tubo hueco puede ascender, por ejemplo a 12 mm. Un espesor de pared del tubo puede ser 2 mm.

La forma de realización de la bobina 4 de acuerdo con la figura. 4 se diferencia de la de la figura. 3 en que la bobina 4 comprende en este caso dos tubos conductores 27a y 27b conectados eléctricamente en paralelo, que a su vez están arrollados en cada caso en espiral y se estrechan a modo de cono hacia el extremo inferior. Los tubos huecos 27a y 27b están formados asimismo de cobre. Su diámetro externo P sin embargo debe ascender en este caso solo a 6 mm. El espesor de pared es solo de 1 mm. Los tubos conductores 27a y 27b pueden arrollarse apretados con ello claramente de manera más sencilla que el tubo conductor 27 de acuerdo con la figura. 3. La altura de paso G de los conductores 27a y 27b es en este caso, por ejemplo, también de 18 mm en cada caso, pero el diámetro mínimo,  $d_u$  es claramente menor.

En forma de realización de la bobina 4 mostrada en la figura 5 esta comprende un conductor 28 que está configurado como tubo hueco doble con una sección transversal rectangular. Una altura de la sección transversal del conductor 28 está señalada con H, un ancho con B. El tubo hueco doble comprende dos tubos huecos 28a y 28b individuales unidos ensamblados entre sí, cuyas cavidades están separadas, es decir no están unidos fluidicamente. Los tubos huecos 28a y 28b tienen en cada caso una sección transversal cuadrada con una longitud lateral  $H_i$ , en donde  $H=2 \cdot H_i$ .

La figura 6 muestra una forma de realización adicional de la bobina 4, en la que los devanados 4b-d están configurados en cada caso como manguitos en forma aproximadamente de herradura, de los cuales cada uno está orientado perpendicular al eje de bobina 9. La bobina 4 de acuerdo con la figura. 6 genera por consiguiente campos con simetría especialmente elevada con respecto al eje de bobina 9. La barra de material 3 puede fundirse de este modo de manera especialmente uniforme.

Cada uno de estos manguitos forma un conductor anular interrumpido eléctricamente en un punto, que está casi cerrado, rodea el eje 9 por tanto por ejemplo en cada caso hasta en 340 grados. Las interrupciones eléctricas están configuradas como entrehierros 31b-d.

Los devanados 4a-d están conectados eléctricamente en paralelo y están configurados en cada caso como tubo hueco para guiar un líquido refrigerante. Los tubos huecos que forman los devanados 4a-d se componen en cada caso de dos piezas en forma de L complementarias en la sección transversal. Una sección transversal de cada uno de los tubos huecos tiene por tanto la forma de un paralelogramo. Por ejemplo el tubo hueco 29 que forma el devanado 4b se compone de las piezas 29a y 29b, que están unidas por uniones soldadas 30. Las superficies externas e internas de las piezas 29a y 29b forman a su vez sectores de cono. Los diámetros internos  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  disminuyen en la dirección z 10. Las distancias  $t_1$  y  $t_2$  determinadas lo largo de la dirección z 10 entre los devanados son iguales.

Los devanados 4b-d están fabricados en cada caso del mismo material conductor y tienen en cada caso una extensión diferente. Para la fusión lo más uniforme posible de la barra en su extremo inferior las corrientes que fluyen en los devanados 4b-d individuales conectados en paralelo pueden adaptarse al otorgar a los devanados 4b-d en cada caso secciones transversales diferentes. En este caso se muestra que las alturas  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  de los devanados 4b-d son diferentes en cada caso. En particular las alturas  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  por ejemplo aumentan linealmente con los diámetros  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  desde abajo hacia arriba. Con ello puede conseguirse que en los devanados conectados en paralelo fluyan en cada caso corrientes aproximadamente iguales, de modo que la barra 3 en su superficie en el extremo inferior se funda de la manera más uniforme posible.

Adicionalmente los entrehierros 31b-d de los distintos devanados 4b-d se han girado unos hacia otros en un ángulo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , como puede reconocerse por la figura 7.

La figura. 8 muestra una forma de realización del dispositivo 1, con el que pueden fundirse en particular materiales sin acoplamiento inductivo, por ejemplo cerámica. Para el calentamiento de la barra 3 mediante la bobina 4 está dispuesta una pantalla 32 que sigue a un contorno de la barra, por ejemplo con simetría rotacional, y abierta hacia la tobera. La pantalla 32 está configurada a partir de un material resistente a altas temperaturas y de acoplamiento inductivo, por ejemplo de platino. La pantalla 32 se calienta normalmente incluso por inducción y emite calor a la barra mediante radiación de calor.

Resultados de los ensayos:

En un primer ensayo con una barra de aluminio a fundir con diámetro  $d = 50$  mm a una velocidad de giro de la barra con aproximadamente  $40 \text{ min}^{-1}$  se transmitió una potencia de alrededor de 14 kW mediante un transformador de alta frecuencia, cuyo campo magnético después del acoplamiento estaba excitado con aproximadamente 105 kHz. En el caso de una tobera con un muy buen conductor se generó una corriente de masa fundida en goteo y todavía no continua en caso de una presión de una presión de flujo por la tobera (presión de gas en la cámara de alta presión) de 10 bar, en donde la situación de la zona de fusión debido a la baja temperatura de fusión de aluminio no era muy fácil de distinguir.

En otro ensayo con una barra de acero fino de 50 mm 14462 se transmitieron 16 kW a 101 kHz. La velocidad de giro

ascendía de nuevo a aproximadamente  $40 \text{ min}^{-1}$  y la tobera era de un buen conductor. En una primera presión de gas de 10 bar pudo generarse brevemente una corriente de masa fundida continua y por lo demás una salida de material en goteo.

- 5 En otro ensayo con una barra de acero fino 14462 de 38 mm se transmitieron potencias muy diferentes en el intervalo de alrededor de 25-35 kW a 107 kHz. La velocidad de giro ascendía de nuevo a aproximadamente  $40 \text{ min}^{-1}$  y la tobera esta vez era de un no conductor, de modo que pudo ajustarse una distancia especialmente escasa entre bobina y tobera Laval. Además se utilizó en este caso la tobera de dos etapas mencionada. En el caso de una presión de flujo por la tobera de 20 bar pudo generarse una corriente de masa fundida continua. El tamaño de grano medio ascendía en este sentido con  $d_{50} = 49 \mu\text{m}$  y  $d_{84} / d_{50}$  era igual a 2,68.

- 15 En la pulverización a chorro de barras de titanio con diámetro de 20 mm a una presión de flujo por la tobera de 17-19 bar frente a la atmósfera con una tobera Laval de un no conductor con contorno de dos etapas se transmitió una potencia de aproximadamente 35 kW a una frecuencia de 112 kHz. La velocidad de giro era igual que antes. Resultó un tamaño de grano medio de  $d_{50} = 51,4 \mu\text{m}$  con  $d_{84} / d_{50} = 2,60$  y en una corriente parcial de  $23,7 \mu\text{m}$  con  $d_{84} / d_{50} = 1,78$ .

- 20 La figura 9 muestra una forma de realización modificada del dispositivo 1 de la figura. 1. Las características ya descritas anteriormente y en particular en relación con la figura 1 están indicadas además con los mismos números de referencia. El dispositivo 1 de acuerdo con la figura. 9 se diferencia del dispositivo 1 de acuerdo con la figura 1 en que a lo largo de la dirección z 10 entre la pared divisoria 6 y la barra de material 3 está dispuesta una pared divisoria 34 adicional. Una abertura de paso en la pared divisoria 34 adicional forma una tobera adicional 33. Una sección transversal de la tobera adicional 33 disminuye en la dirección z 10 positiva y con ello en la dirección de flujo de la corriente de masa fundida 16 en forma de un cono. Un eje de tobera de la tobera adicional 33 coincide con el eje 9, de modo que la tobera de atomización 5 y la tobera adicional 33 están dispuestas alineadas.

- 30 La corriente de masa fundida 16 que se forma en el extremo de barra 15 se introduce por tanto inicialmente en la tobera adicional 33. Esta está configurada de tal modo que acelera el gas de atomización 19 que entra en la tobera adicional en la abertura de entrada de la tobera adicional 33 dirigida a la barra de material 3 en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida 16, es decir a lo largo de la dirección z 10 positiva, al menos a 0,5 veces la velocidad del sonido del gas de atomización 19. La corriente de masa fundida 16 se centra y se expande de este modo ya antes de la entrada en la tobera de atomización 5. Se ha mostrado que esto puede mejorar aún más la calidad del polvo generado en la tobera de atomización 5, tanto con respecto al tamaño de grano alcanzado como con respecto al ancho de distribución de tamaño de grano alcanzado. En la figura 9 un área de la sección transversal mínima de la tobera adicional 33 determinada perpendicular al eje de tobera 9 asciende al menos a 5 veces el área de la sección transversal mínima de la tobera de atomización 5. Sin embargo, también son concebibles diseños de la tobera adicional 33 diferentes a este.

- 40 Para que la tobera adicional 33 acelere (previamente) el gas de atomización 19 de la manera anteriormente descrita, a ambos lados de la pared divisoria 34 se requiere una diferencia de presión adecuada. Esta se genera mediante los primeros medios de regulación de presión 17 anteriormente descritos y mediante terceros medios de regulación de presión 35. Los terceros medios de regulación de presión comprenden como los primeros medios de regulación de presión 17 una línea de alta presión y una válvula de regulación de presión, que están conectados a un acumulador de gas de alta presión con argón y a través de los cuales puede introducirse gas argón en un espacio intermedio 36 entre las paredes divisorias 6 y 34. Por ejemplo los medios de regulación de presión 17, 18 y 35 pueden ajustarse de tal modo que la presión de gas  $p_3$  en el espacio intermedio 36 asciende aproximadamente a  $p_3 = (p_1 + p_2) / 2$ , designando  $p_1$  y  $p_2$ , como ya se ha descrito anteriormente, la presión de gas en la cámara de alta presión 7 y en la cámara de atomización 8. En cualquier caso los medios de regulación de presión 17, 18, 35 han de ajustarse de modo que se cumpla:  $p_2 < p_3 < p_1$ .

50

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo (1) para la fusión por zona flotante de un material y para la atomización del material fundido para producir polvo, que comprende:

5 una tobera de atomización (5), que está configurada como tobera Laval y define un eje de tobera (9);  
una bobina de inducción (4) con devanados (4a-d), que se estrechan al menos por secciones en la dirección hacia la tobera de atomización (5); y una barra de material (3) introducida al menos parcialmente en la bobina de inducción (4);

10 en donde la bobina de inducción (4) está diseñada para fundir el material de la barra de material (3) para generar una corriente de masa fundida (16); y

en donde la bobina de inducción (4) y la tobera de atomización (5) están dispuestas de tal modo que la corriente de masa fundida (16) para la atomización de la corriente de masa fundida (16) mediante un gas de atomización (19), que puede introducirse en la tobera de atomización (5), puede introducirse en la tobera de atomización (5) a través de una primera abertura (20) de la tobera de atomización (5);

15 **caracterizado por que**

la tobera de atomización (5) está configurada de tal modo que el gas de atomización (19) solo puede introducirse o se introduce en la tobera de atomización (5) a través de dicha primera abertura (20) de la tobera de atomización (5);

20 en donde la tobera de atomización (5) está diseñada para acelerar el gas de atomización (19) de forma laminar en una dirección en paralelo a la corriente de masa fundida (16) al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización (19);

en donde la bobina de inducción (4) y la tobera de atomización (5) están configuradas como componentes independientes y la bobina de inducción (4) a lo largo del eje de tobera (9) está distanciada de la tobera de atomización (5);

25 en donde la bobina de inducción (4) y la tobera de atomización (5) están dispuestas de tal modo que  $a_{\min} < 4 \cdot d_{\min}$ , en donde  $a_{\min}$  es la distancia mínima entre la bobina de inducción (4) y un plano (24), dado por el área de sección transversal de la tobera de atomización (5) mínima determinada, perpendicular al eje de tobera (9) de la tobera de atomización (5), y en donde  $d_{\min}$  es un diámetro interno mínimo de la tobera de atomización (5) en dicho plano (24); y

30 en donde la barra de material (3), la bobina de inducción (4) y la tobera de atomización (5) están dispuestas de tal modo que a lo largo del eje de tobera está dispuesto al menos un devanado de la bobina de inducción (4) entre la tobera de atomización (5) y un extremo de la barra de material (3) dirigido a la tobera de atomización (5), de modo que la corriente de masa fundida (16) antes de la entrada de la corriente de masa fundida (16) en la tobera de atomización (5) se calienta o puede calentarse por inducción mediante la bobina de inducción (4).

2. Dispositivo (1) según la reivindicación 1, **caracterizado por que** el material, del que está formado la barra de material (3), comprende metal o cerámica, en donde el metal contiene preferentemente aluminio, hierro o titanio.

40 3. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** un diámetro interno  $d_{\min}$  (23) mínimo de la tobera de atomización (5) es menor de 7 mm.

45 4. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** la barra de material (3) y la tobera de atomización (5) están dispuestas de tal modo que para una distancia mínima L (25) entre la barra de material (3) y dicho plano (24) mencionado se cumple:  $L \leq 5 \cdot d_{\min}$ .

5. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** se cumple:  $a_{\min} \leq 3 \cdot d_{\min}$ .

50 6. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** la tobera de atomización (5) está formada de un material de tobera para minimizar una cantidad de calor disipada mediante la actividad de la bobina de inducción (4) en la tobera de atomización (5), para cuya resistencia eléctrica específica  $\rho$  se cumple:  $\rho \leq 0,02 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$  o  $\rho \geq 10^{-2} \Omega\text{m}$ .

55 7. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por** una cámara de alta presión (7), una cámara de atomización (8) conectada fluidicamente con la cámara de alta presión (7) a través de la tobera de atomización (5), primeros medios de regulación de presión (17) para introducir el gas de atomización (19) en la cámara de alta presión (7) y para regular una primera presión del gas  $p_1$  en la cámara de alta presión (7), así como segundos medios de regulación de presión (18) para regular una segunda presión del gas  $p_2$  en la cámara de atomización (8), en donde los primeros y los segundos medios de regulación de presión están diseñados para

60 ajustar las presiones  $p_1$  y  $p_2$  para la aceleración del gas de atomización (19) en una dirección en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida (16) de tal modo que se cumple:  $p_1/p_2 > 1,8$  y  $p_1 > 10$  bares.

65 8. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** al menos uno de los devanados (4a-d) de la bobina de inducción (4), que está dispuesto en la zona de un extremo (15) de la barra de material (3) dirigido a la tobera de atomización (5), y en concreto preferentemente al menos el último devanado (4d) de la bobina de inducción (4) dirigido a la tobera de atomización (5), para generar un campo electromagnético lo más

simétrico posible en esta zona con respecto a un eje de barra de la barra de material (3) discurre al menos por secciones en perpendicular al eje de barra.

5 9. Dispositivo (1) según la reivindicación 8, **caracterizado por que** el al menos un devanado( 4d) está configurado como conductor anular interrumpido eléctricamente en un punto, preferentemente como conductor anular casi cerrado.

10 10. Dispositivo (1) según la reivindicación 9, **caracterizado por** al menos dos de estos conductores anulares, en donde los al menos dos conductores anulares están conectados eléctricamente en paralelo.

15 11. Dispositivo (1) según la reivindicación 10, **caracterizado por que** los conductores anulares con diferente perímetro tienen secciones transversales y/o tienen diferentes distancias a lo largo del eje de bobina entre sí, de modo que tienen cada uno de ellos una resistencia eléctrica aproximadamente igual y generan a lo largo del eje de barra una distribución de campo lo más homogénea posible.

20 12. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** un conductor que forma la bobina de inducción (4) está configurado para guiar un líquido refrigerante como tubo hueco.

25 13. Dispositivo (1) según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por** al menos una tobera adicional (33), que está dispuesta alineada con la tobera de atomización (5) y está dispuesta preferentemente entre la barra de material (3) y la tobera de atomización (5), de modo que la corriente de masa fundida (16) puede guiarse o se guía también a través de la tobera adicional (33), estando diseñada la tobera adicional (33) para acelerar un gas introducido con la corriente de masa fundida (16) en la tobera adicional (33) en una dirección en paralelo a la corriente de masa fundida (16) al menos hasta 0,5 veces la velocidad del sonido del gas introducido en la tobera adicional (33).

30 14. Procedimiento para la producción de polvo mediante fusión por zona flotante de un material y mediante atomización del material fundido mediante el dispositivo según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende las etapas de:

35 introducir al menos parcialmente una barra de material (3) en una bobina de inducción (4) que disminuye a modo de cono al menos por secciones;  
 aplicar en la bobina de inducción (4) una tensión alterna para la fusión de la barra de material (3) y para generar una corriente de masa fundida (16);  
 40 introducir la corriente de masa fundida (16) en una tobera de atomización (5) a través de una primera abertura (20) de la tobera de atomización (5); e  
 introducir un gas de atomización (19) en la tobera de atomización (5) y atomizar la corriente de masa fundida (16) mediante el gas de atomización (19);  
 en donde el gas de atomización (19) se introduce en la tobera de atomización (5) solo a través de la primera  
 45 abertura (20) de la tobera de atomización (5);  
 en donde el gas de atomización (19) introducido y/o que va a introducirse en la tobera de atomización (5) a través de la primera abertura (20) se acelera de forma laminar en una dirección en paralelo a una dirección de flujo de la corriente de masa fundida (16) al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización (19), de modo que la corriente de masa fundida (16) se divide o incluso revienta y se genera polvo con un tamaño de grano en el rango de micrómetros y/o en el rango de submicrómetros; e  
 en donde la corriente de masa fundida (16) antes de la entrada de la corriente de masa fundida (16) en la tobera de atomización (5) se calienta por inducción mediante la bobina de inducción (4).

50 15. Procedimiento según la reivindicación 14, en donde el gas de atomización (19) se acelera en paralelo a la dirección de flujo de la corriente de masa fundida (16) a lo largo de un trayecto de aceleración con una longitud  $L_B$  al menos hasta la velocidad del sonido del gas de atomización (19), en donde para  $L_B$  se cumple:  $L_B < 5 \cdot d_{\min}$ , en donde  $d_{\min}$  (23) es el diámetro mínimo de la tobera de atomización (5) en perpendicular al eje de tobera.

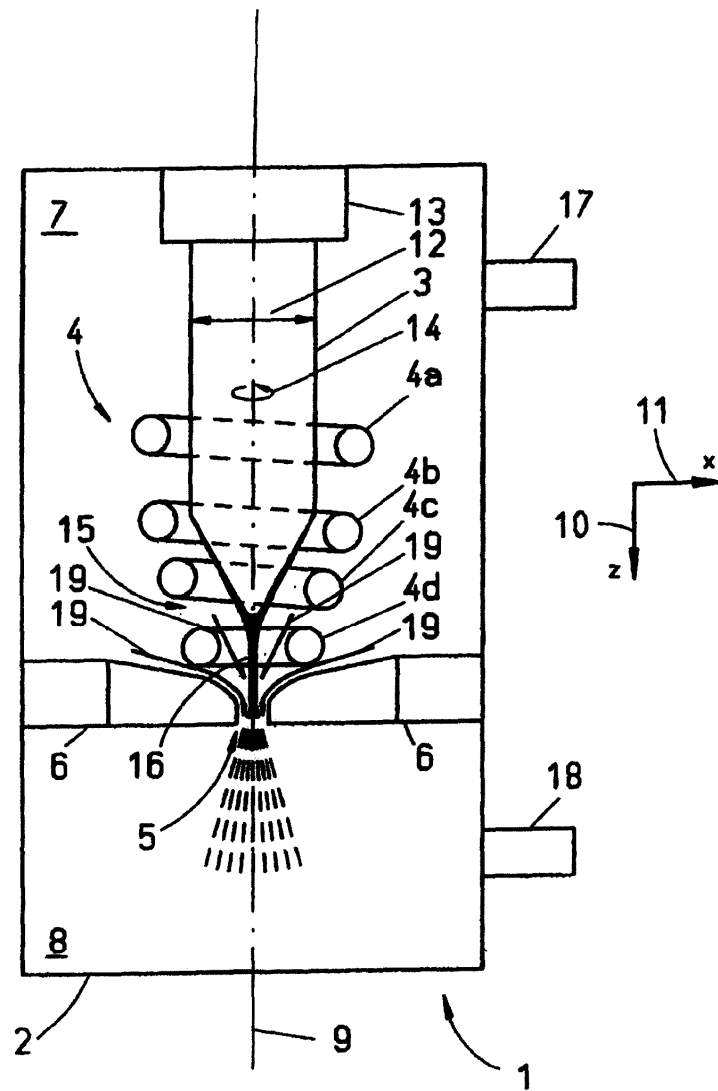


Fig. 1

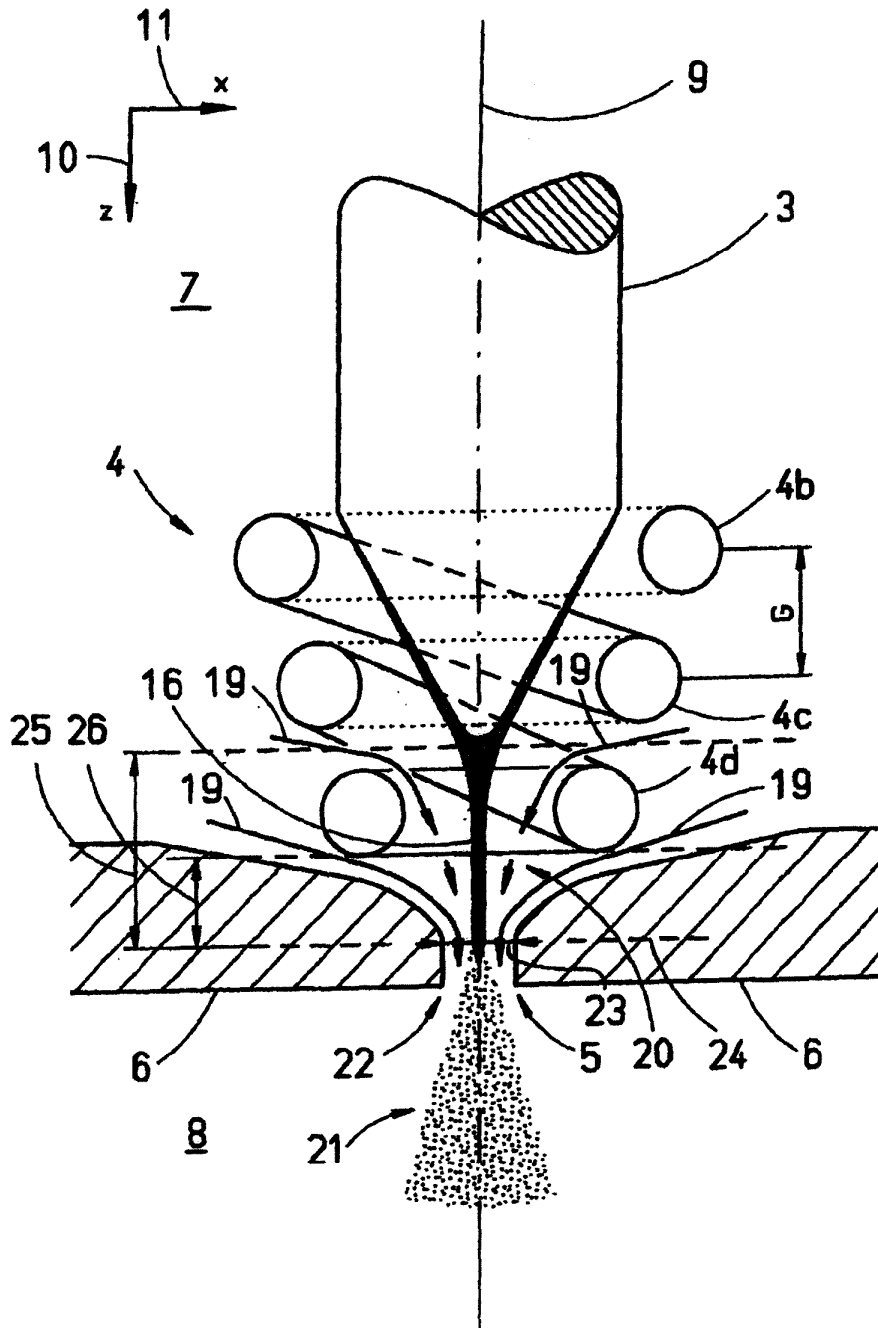


Fig. 2

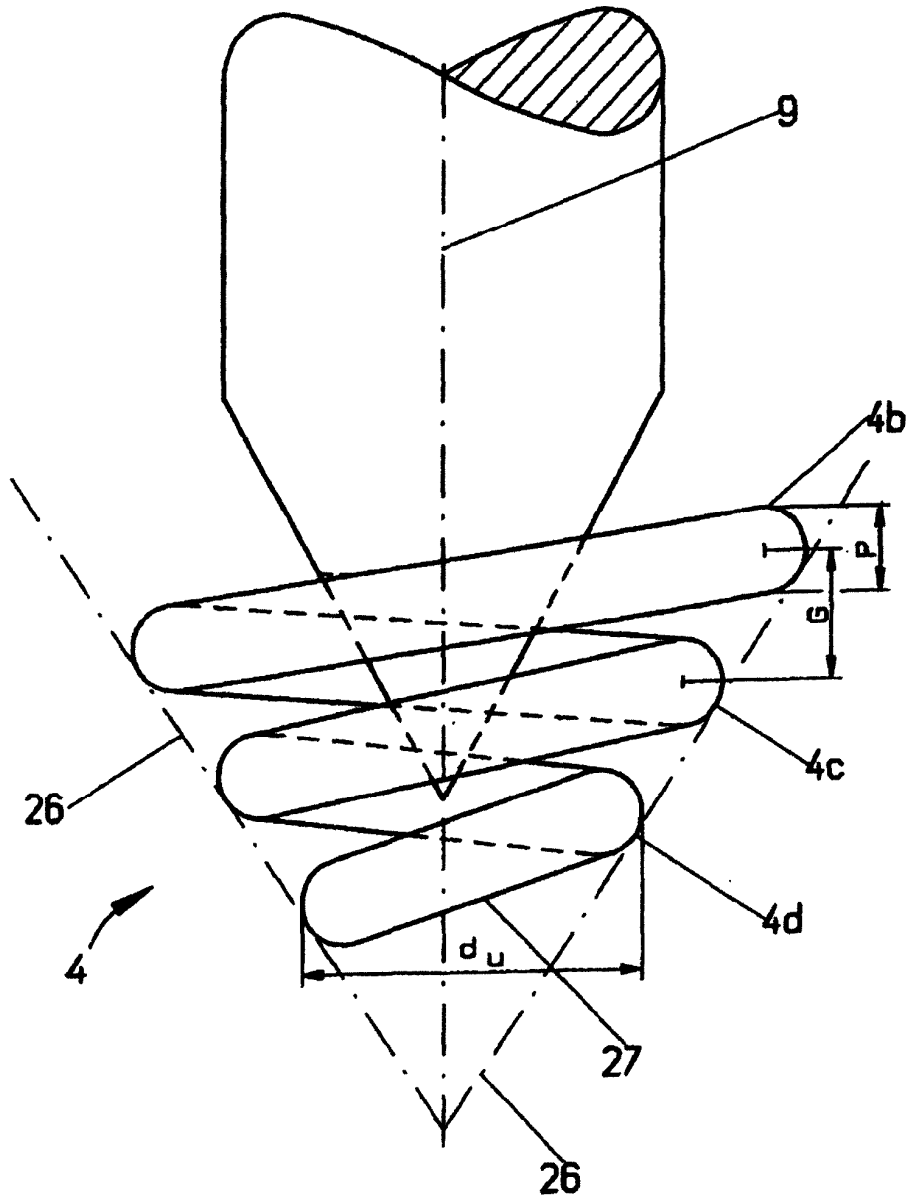


Fig. 3



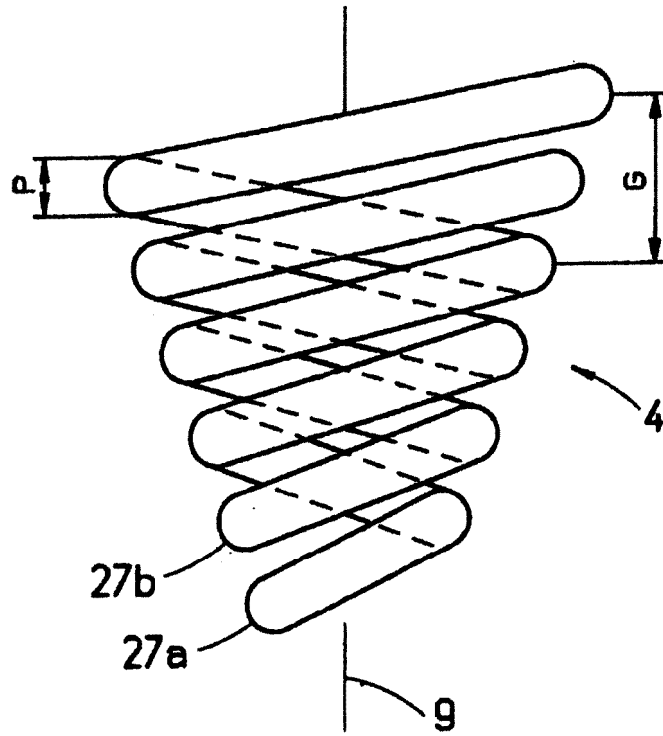


Fig. 4

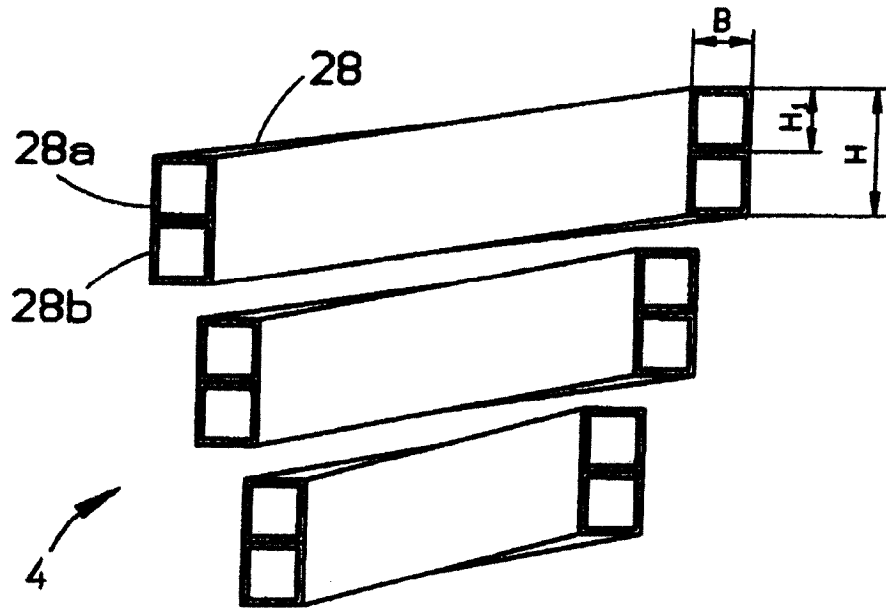


Fig. 5

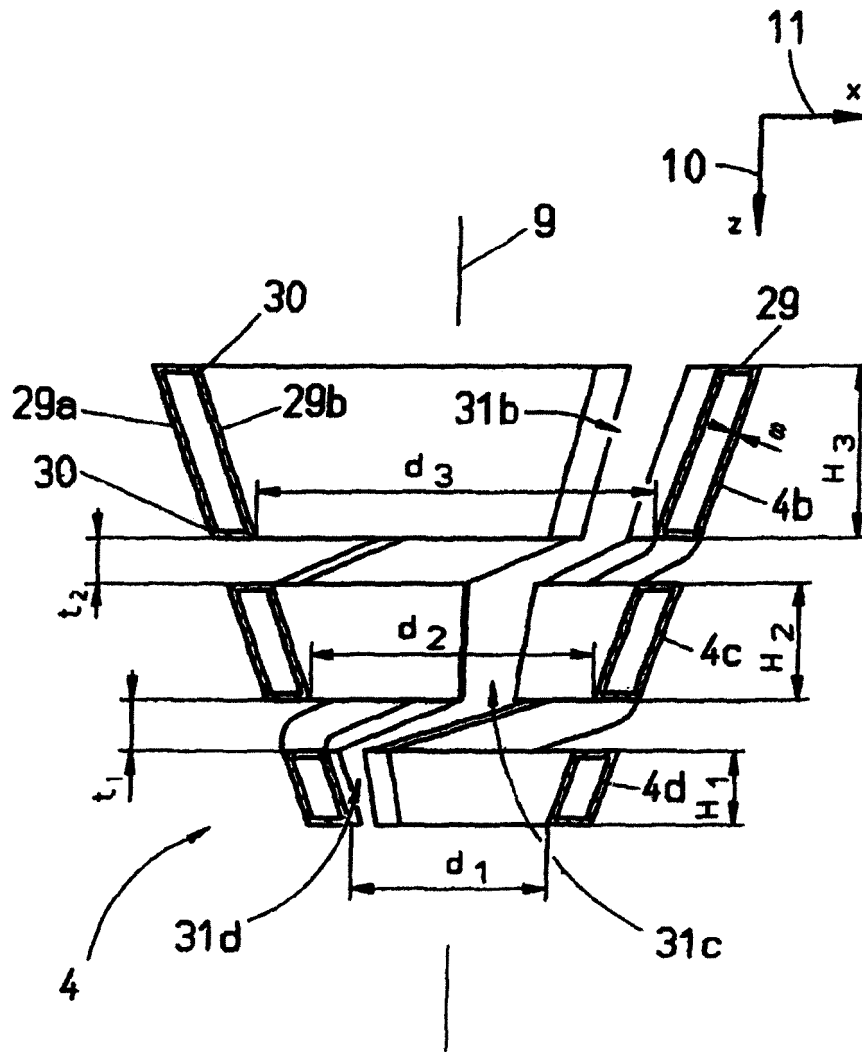


Fig. 6

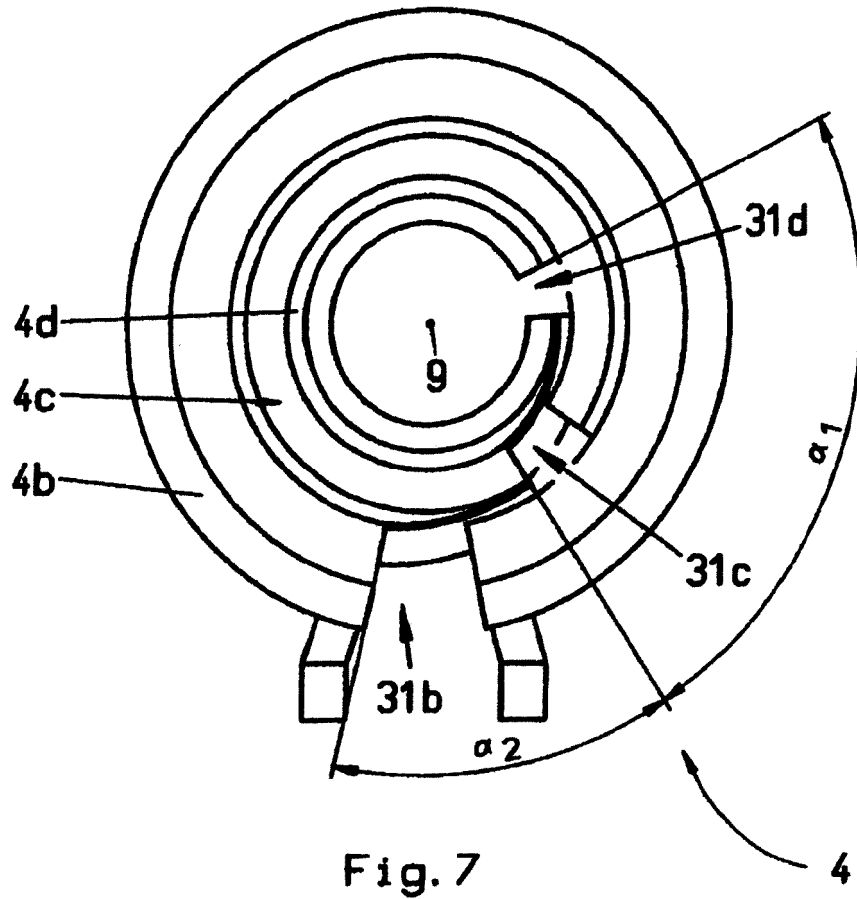


Fig. 7

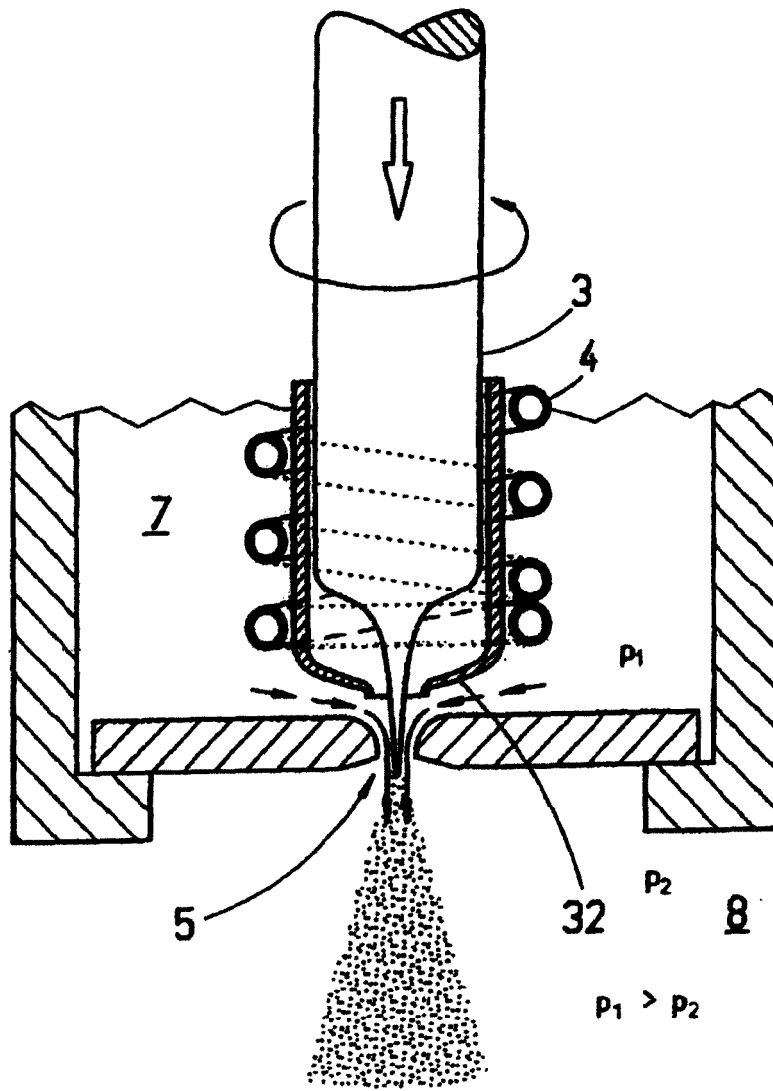


Fig. 8

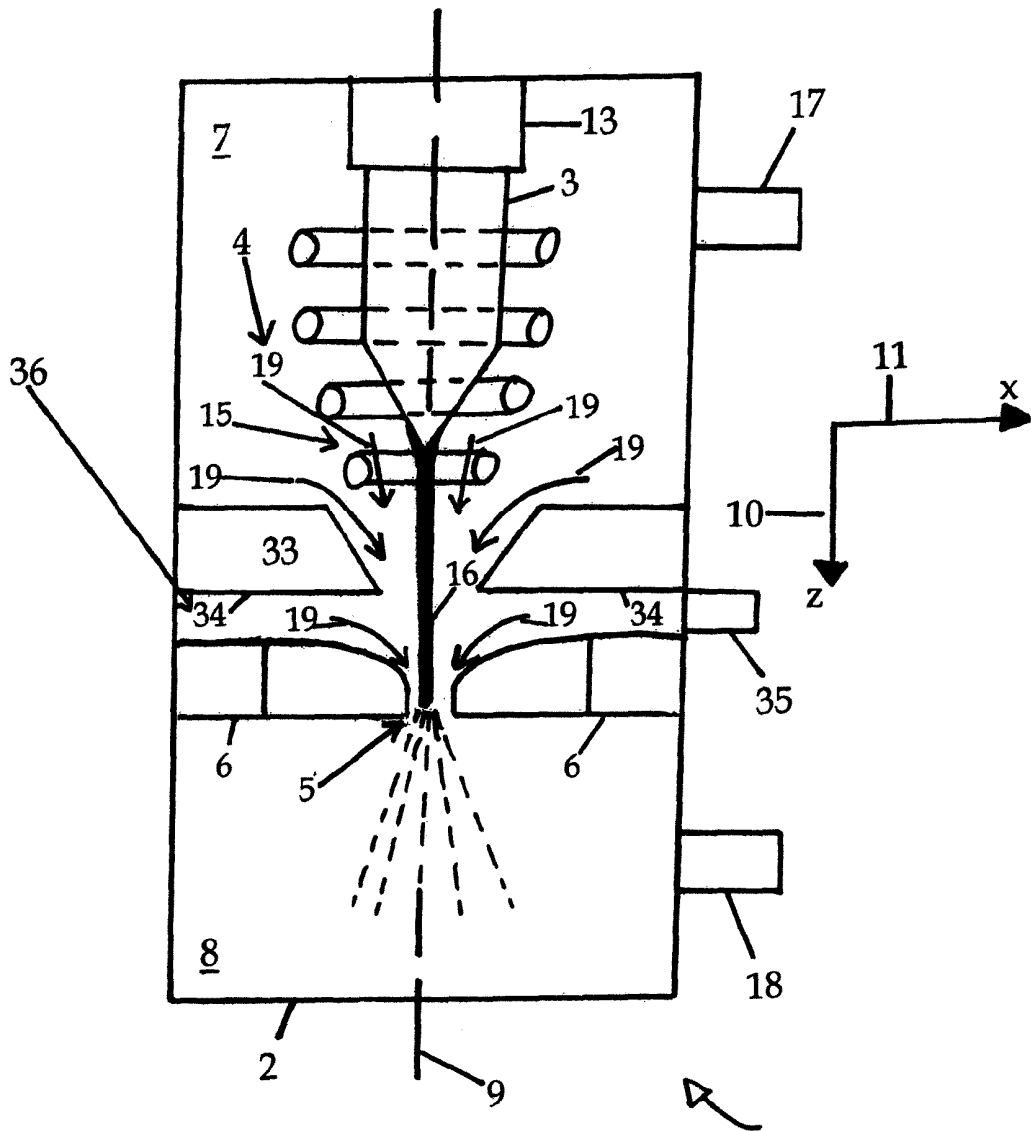


Fig. 9