

mc/

Caso W.G. Pfann 30

229377

229377

15 JUN



P A T E N T E D E I N V E N C I O N

=====

a favor de

WESTERN ELECTRIC COMPANY INCORPORATED - de nacionalidad
norteamericana - domiciliada en NEW YORK (E.U.) 195 Broadway,

por:

" Procedimiento para mantener suspendido, por medios elec-
tromagnéticos un material líquido o fundido ".

-----:oOo:-----

M e m o r i a D e s c r i p t i v a

Este invento se refiere a métodos de tratamiento de
un material, por los cuales se suspenden electromagnética-
mente porciones del mismo. El procedimiento de este inven-

15 JU



229377

to es particularmente aplicable a los métodos de fusión por zonas descritos en "Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers", vol. 194, págs. 747 a 753, 1952, y sirve para el tratamiento de materiales semi-conductivos tales como germanio y silicio; materiales reactivos como titanio, circonio, hierro, tantalio y berilio; sales fundidas, y electrolitos con apreciable conductividad, tales como soluciones acuosas de cloruro sodico o de hidróxido potásico.

10 El procedimiento de este invento se basa en la fuerza reactiva resultante de mantener un componente de campo magnético a través de una masa de material en tratamiento, con un ángulo de 90 grados respecto a un componente de circulación de corriente por la referida masa.

15 En el procedimiento de este invento, se mantiene un flujo de corriente por una porción de material fundido, que está en contacto íntimo y humedece una porción sólida, generalmente del mismo material o de otro afín. Un campo magnético que pase por el material fundido, y tenga un componente en ángulo recto con la corriente que circula, produce una fuerza reactiva aproximadamente igual y de dirección opuesta a cualquier fuerza no equilibrada, tal como la de la gravedad, que actúe sobre el material en tratamiento, ya sea líquido, ya líquido y sólido, dentro del campo magnético. Las fuerzas
20 estabilizantes que compensan ligeras variaciones de fuerza reactiva por variaciones del flujo de corriente y/o de la fuerza del campo magnético, así como desviaciones de los valores correctos de esos parámetros, comprenden la tensión superficial en la fase líquida y la adherencia entre las fases líquida y sólida. Normalmente existen otras influencias
25 de este orden, y de ellas se trata a continuación.

30



229377

Se observará que el procedimiento descrito es particularmente aplicable a la fusión por zonas antes mencionada, en la que en todo momento hay una fase líquida en contacto con una fase sólida de material en tratamiento. En la fusión por zonas donde se hace pasar una zona fundida a través de una masa sólida de material, por medio de un generador móvil de calor suficiente para fundir el material, el aparato de suspensión de este invento está, por lo general, conectado mecánicamente con el aparato calentador, de modo que la zona fundida móvil se halla continuamente bajo la influencia del campo magnético. En la fusión por zonas, practicada conforme se describe en esta memoria, suele hacerse circular corriente por toda la masa en tratamiento, estableciendo una diferencia de potencial a través de los extremos de la masa.

Aunque el procedimiento aquí descrito es de evidente utilidad en el campo de la fusión por zonas, especialmente cuando se aplica a materiales semiconductivos, sirve también para elaborar materiales no semiconductivos, aún empleando métodos distintos del de fusión por zonas. Por ejemplo, los métodos de suspensión valen para formar un lingote sólido homogéneo de una masa de material concretado que se introduce progresivamente en un calentador. Los métodos de suspensión son asimismo provechosos en la metalurgia a base de polvos, donde una masa de material fundido puede suspenderse mientras se incorpora nuevo material en polvo. En este último ejemplo, el material fundido se puede retirar del calentador y hacerlo cristalizar cuando sale de la influencia del aparato de suspensión electromagnética, todo ello aproximadamente al mismo ritmo a que se añade nuevo material a la porción fundida, o bien

16 JUN



- 4 -

229377

pueden aumentarse gradualmente la corriente que circula y/o la intensidad del campo, a fin de compensar el peso adicional del material incorporado.

5 Otras aplicaciones comprenden la suspensión de material fundido reactivo, con propósito de aleación, pero evitando toda contaminación del material por contacto con el recipiente, mientras que conviene exponer la mayor superficie posible, por ejemplo, para añadir un agente gaseoso complementario, retirar un componente volátil por evaporación, o hacer reaccionar una impureza de la fundición con un agente de la atmósfera. Se describirán estas y otras especies de métodos de suspensión.

10

Con objeto de ilustrar el invento, deberán tomarse como referencia los planos adjuntos, en los cuales:

15 La figura 1, representa un esquema de las fuerzas vectoriales que producen la suspensión del material, de acuerdo con los principios de este invento.

Las figuras 2A y 2B, son esquemas de frente y de perfil de un aparato de fusión por zonas, en el que la zona fundida no entra en contacto con las paredes del recipiente, en virtud del método de suspensión de este invento.

20

Las figuras 3A, 3B y 3C, son plantas de caras de imán, configuradas para aumentar la uniformidad del campo magnético apropiado para la práctica de este invento.

25 Las figuras 4A, 4B y 4C, son esquemas de caras de imán cuyo uso se traduce en campos magnéticos no uniformes, con un componente horizontal de intensidad de campo decreciente hacia arriba, y que, utilizado en la práctica de este invento, ejerce además un efecto estabilizador sobre el componente vertical de la fuerza reactiva de suspensión.

30

Las figuras 5A y 5B son esquemas de frente y de perfil



229377

fil de un aparato de suspensión adaptado para la formación de un material sólido homogéneo a partir de una carga conglomerada.

5 La figura 6, es una elevación frontal de un aparato de suspensión que sirve para cristalizar material de carga en polvo o en grano.

Las figuras 7A y 7B, son esquemas de frente y de perfil de un aparato de suspensión para uso en una sencilla operación de fusión; y

10 La figura 8, es una planta esquemática de un tipo especialmente estable de tratamiento de suspensión, por el cual se suspende una masa abombada de material líquido dentro de un campo magnético no uniforme.

15 En la figura 1 se representa parte de una masa -1- de material en tratamiento. Un generador de calor, no dibujado, produce la zona fundida -2-, adyacente y contigua a porciones sólidas -3- y -4-. Manteniendo un potencial de tensión a través de la porción de masa -1- representada, se produce una circulación de corriente, indicada aquí como vector -5- que sigue el eje longitudinal de la masa -1-. El vector -6-, desviado 90 grados en dirección opuesta a la de avance del reloj respecto al vector -5-, visto por arriba, representa un componente de campo magnético en ángulo recto con la masa -1-, y sobre un plano horizontal con ella.

20 La fuerza reactiva principalmente responsable de la suspensión de la zona fundida -2- se indica en forma de vector -7-, desviado 90 grados de los vectores -5- y -6-, y que por ello sigue una dirección vertical ascendente.

25 En la práctica del invento, el paso de corriente continua -I- por el lingote horizontal -1- produce el vector -5-. El vector -6- proviene de un campo magnético horizontal

30



resultante, por ejemplo, de colocar dos caras polares de polaridad opuesta a los lados respectivos del lingote -1-. Aplicando calor desde cualquier generador térmico, como un arco, un calentador de resistencia, o un calentador inductivo de alta frecuencia, en el lingote -1- se forma una zona fundida -2- dentro de un campo magnético de intensidad H. La acción recíproca entre la corriente I, indicada como vector -5-, y el campo magnético de intensidad H, indicado como vector -6-, produce una fuerza reactiva, señalada como vector -7-, que en este ejemplo se dirige verticalmente hacia arriba. La magnitud de fuerza F viene dada por la conocida relación:

$$F = \frac{HI\ell}{10} \text{ dinas,} \quad (1)$$

donde H es la intensidad magnética en oersteds; I, la corriente que pasa por el material que está dentro del campo, en amperes, y ℓ , la longitud del conductor dentro del campo magnético, en centímetros.

Una ecuación que indique el producto HI necesario para sostener una zona fundida en oposición a la gravedad puede obtenerse como sigue: F, la fuerza reactiva de suspensión, es la requerida para sostener una masa igual a la contenida en la zona fundida. Suponiendo W igual a la masa de la zona fundida, y g igual a la aceleración de la gravedad, numéricamente igual a 980,7 cm/seg², se tiene

$$F = Wg = \rho A\ell g,$$

donde ρ = densidad en gramos por cm³, y A = área de la sección transversal del lingote, en cm². Eliminando A y ℓ , por combinación de la anterior ecuación con (1), resulta:

15



= 7 =

229377

$$HI = 10 \rho Ag = 9806 \rho A \quad (2).$$

Para una sección transversal de 1 cm^2 , la ecuación (2) se puede simplificar todavía:

5

$$HI \approx 10^4 \rho \quad (2A).$$

Debe advertirse que, en el desarrollo anterior, se suponen una sección transversal uniforme de la zona fundida, y una intensidad uniforme de campo magnético por toda la longitud de dicha zona, aunque, como se expondrá, no se requieren estas condiciones para operar de conformidad con el invento.

10

Un ejemplo ilustrativo, que indica las magnitudes de corriente y de intensidad de campo necesarias, es el descrito a continuación. El material elegido es silicio. Se considera apropiada la selección de silicio como ejemplo, por tratarse de un material semiconductor que posee muchas características convenientes para el diseño de aparatos semiconductores, tales como transistores, y además, porque ha ocasionado muchas dificultades la contaminación del material fundido por impurezas contenidas en el crisol.

15

20

EJEMPLO ILUSTRATIVO 12.

Suponiendo una intensidad H de campo magnético de 2500 oersteds, el flujo de corriente I requerido para suspender una zona fundida de $6,45 \text{ cm}^2$ de sección transversal circular puede computarse como sigue. La densidad del silicio es de $2,33 \text{ g/cm}^3$. De la ecuación (2) se obtiene:

25

$$I = \frac{9806 \rho A}{H}$$

Sustituyendo por los valores dados:

$$I = \frac{(9806) (2,33) (6,45)}{2500} = 59 \text{ amperes.}$$

30

Para los fines de este ejemplo, se supone que el cam-

15 JUL



229347

5 po es uniforme y está en un plano horizontal, y que el plano de la corriente forma con el campo un ángulo de 90 grados, también sobre un plano horizontal. No se toman en consideración otras fuerzas estabilizantes que se estudiarán, y que permiten cierta latitud en cuanto a la magnitud de la fuerza reactiva. Suponiendo que la reactividad del silicio sea de 0,05 ohm-cm., y de 30 cm. la longitud media del lingote entre pinzas de electrodo, la tensión requerida para el paso de la corriente de suspensión en este ejemplo viene a ser de 14 volts.

10 Debe advertirse que el valor de resistividad que interesa no es el de la temperatura ambiente, sino el de la temperatura de régimen del material sometido a tratamiento. Para materiales semiconductivos, la resistividad descende mucho al aumentar la temperatura del material. Si los electrodos están muy separados, de manera que abarquen una cantidad apreciable de material relativamente fresco, puede ser útil emplear calentadores auxiliares dispuestos alrededor de las porciones sólidas del material comprendido entre los electrodos.

15 La merma de resistividad del silicio a una temperatura elevada ilustra la relación para materiales semiconductivos. Para silicio muy puro, la resistividad eléctrica a la temperatura ambiente puede ser de 100 ohm-cm. o mayor; sin embargo, la temperatura de la región fundida es de 1400°C o más alta, de donde resulta algún calentamiento de las porciones sólidas adyacentes. Si suponemos que se mantiene en el lingote sólido una temperatura media de 500°C, la resistividad correspondiente se aproxima a 0,5 ohm-cm. En el ejemplo ilustrativo 1º, suponiendo una resistividad de 0,5 ohm-cm., se necesita un potencial de tensión de 140 volts

5

10

15

20

25

30

15 JUN



229377

para mantener un flujo de corriente de 59 amperes.

Se ve, pues, que la fuerza de suspensión F depende sólo del producto HI , y no de H o de I por separado. Por esta razón, una elección de valores de H y de I para un determinado método de suspensión se basa en consideraciones secundarias, tales como economía y calentamiento I^2R .

La limitación más corriente en la selección de parámetros dentro del método de suspensión es la intensidad prácticamente disponible del campo magnético máximo. Esto es de especial importancia cuando el material sometido a tratamiento tiene una gran resistividad, y por ello limita el flujo práctico de corriente y/o introduce problemas de disipación térmica. Además, como el campo magnético puede ser proporcionado por imanes permanentes que no ocasionen gastos de funcionamiento, y como el aumento de corriente en circulación hace mayores esos gastos, en general puede ser conveniente trabajar con gran flujo de campo magnético y relativamente escaso flujo de corriente. Las excepciones son fáciles de imaginar: por ejemplo, con materiales de gran resistividad, en los que la resistividad eléctrica disminuye a temperatura elevada, puede convenir una gran circulación de corriente, y un consiguiente calentamiento I^2R .

Se obtienen con facilidad intensidades magnéticas de 10000 oersteds y más entre las caras polares de imanes permanentes ordinarios, disponibles en el comercio, o de electroimanes de tamaño moderado, en 1 pulgada de longitud de entrehierro. Magnitudes de este valor pueden conseguirse en entrehierros de 2 pulgadas y más, recurriendo, por ejemplo, a imanes de dimensiones mayores que las corrientes.

Con frecuencia conviene llegar a una mayor uniformidad de intensidad magnética H a lo largo del lingote. Esto



229377

se logra comúnmente aumentando el área de la cara polar, con lo cual se reduce el promedio de la intensidad magnética. En los casos en que se prevé cierto sacrificio en intensidad magnética por el deseo de mantener un campo uniforme, una escala posible de intensidad de campo puede ser del orden de 1000 a 5000 oersteds, aproximadamente.

El valor mínimo de la intensidad magnética H utilizable depende del valor óptimo de la corriente I . Este valor óptimo depende a su vez de factores tales como el valor de la tensión disponible y del calentamiento I^2R máximo tolerable, que en algunos casos puede venir limitado por la energía necesaria para fundir la sustancia. Aquí se advierte que puede convenir un gran calor I^2R , ya para disminuir la resistividad a fin de que pase más corriente, ya para reducir al mínimo o eliminar la energía requerida en el calentador. Además, según se indica, conviene a veces disipar algo de calor I^2R mediante un refrigerante, y mantener así un valor de corriente que de otro modo bastaría para fundir el material. Desde un punto de vista mecánico, el empleo de mucha corriente, y por ello de imanes más pequeños o entrehierro mayor, puede simplificar el diseño de calentadores para mantener fundido el material. Otro efecto que puede ser perjudicial proviene del empleo de una corriente copiosa para fusión por zonas, porque el mucho calor I^2R disminuye el gradiente o escalonado de temperatura de la interficie posterior de la zona o superficie de contacto con el resto del material, y puede traducirse por ello en menor regulación de la longitud de la zona, y, en consecuencia, de la composición.

Una limitación secundaria del valor máximo del flujo de corriente I , de importancia cuando es pequeña el área de



229377

la sección transversal del lingote, se conoce por "efecto de constricción" (pinch effect). Esta acción tiende a estrechar y dividir la zona fundida, por obra del campo magnético de la corriente I que circula. En general, cualquier influencia no prevista que contribuya a restringir o ensanchar alguna porción de la zona fundida suspendida deberá evitarse, porque perturbaría el equilibrio entre la masa suspendida y la fuerza F suspensora. Como se explicará, tales variaciones, cuando convengan, pueden mantenerse en condiciones de equilibrio por medio de gradientes de flujo de campo adecuados. Se expondrán algunos factores que deben considerarse al determinar las dimensiones óptimas de la zona suspendida.

En las figuras 2A y 2B se representa una instalación típica de fusión por zonas suspendidas. La carga -10-, por ejemplo, de unos 12,5 mm. de diámetro, vá encerrada concéntricamente en un tubo -11- de cuarzo de unos 25 mm. de calibre, que se encaja a su vez en bloques terminales -12- y -13- por medio de empaquetaduras -14- y -15-. Los bloques terminales -12- y -13- descansan mecánicamente en montantes -16- y -17-, que a su vez se representan unidos a un soporte móvil -18-. En los bloques terminales -12- y -13- entran tubos -19- y -20-, de entrada y salida de gas, para mantener una atmósfera apropiada dentro del tubo de cuarzo -11-. Durante la operación, los tubos de admisión -19- y de salida -20- permiten llenar el tubo -11- de cuarzo de una atmósfera fija o móvil de gas inerte, o de cualquier otro gas que haya de ejercer algún efecto conveniente sobre la composición del material en tratamiento. Los tubos -19- y -20- de entrada y salida pueden servir asimismo para que entre o salga un flúido refrigerante o de calefacción. Si



229377

se quiere trabajar en una cámara evacuada, puede taparse la admisión -19- o la salida -20-, y aplicarse la bomba de vacío al conducto no tapado.

5 A través de la masa -10- se introduce corriente de suspensión I por medio de electrodos -21- y -22-, que pueden aplicarse directamente a la masa -10-, como se indica, o bien a secciones terminales -12- y -13-, con tal que sean conductoras. En general, la tensión aplicada a través de los electrodos -21- y -22- es corriente continua proporcio-
10 nada, por ejemplo, desde una batería o un generador de corriente alterna rectificada. Se verá, sin embargo, que el potencial de tensión aplicado a través de los electrodos -21- y -22- puede ser alterno en ciertas circunstancias, por ejemplo, cuando el campo magnético se produce electromagnética-
15 mente por una corriente en fase. Además, fuerzas estabilizantes que normalmente existen en el curso de la operación, permiten obtener una corriente de suspensión I con un componente de corriente alterna como el que puede producir un rectificador sin filtro.

20 En actividad, un mecanismo tal como el carro -18- hace posible mover longitudinalmente la masa -10- entre los polos -23- y -24-, que pueden ser, por ejemplo, los polos Norte y Sur de un imán Alnico o de dos imanes Alnico de barra, de igual potencia. Tal imán Alnico puede tener forma
25 de herradura grande, con un peso aproximado de 65 libras. En el aparato representado, las caras -23- y -24- del imán pueden ser caras polares de dos barras imanadas distintas, de 75 x 75 x 225 mm., por ejemplo, montadas en una armazón no representada, con el espacio ajustable para variar la in-
30 tensidad H del campo.

Como la temperatura de las caras polares magnéticas



229377

puede elevarse en plena operación hasta un punto que perjudique las propiedades magnéticas del imán o de los imanes, se exponen medios para pasar un refrigerante por las caras polares. En la figura 2A, se puede pasar refrigerante por secciones huecas -25- y -26-; las paredes interiores de las secciones -25- y -26- pueden estar constituidas por las caras mismas del imán, o ser distintas. En cualquiera de los casos, se interpone un aislante o absorbedor térmico entre el calentador -28- y las caras polares -23- y -24-.

La zona fundida -27- se forma dentro de la masa -10- por intercambio térmico entre el generador de calor -28-, que puede ser un mechero, un carrito de resistencia, una bobina de inducción de alta frecuencia, o cualquier otro calentador corriente. De acuerdo con la práctica de fusión por zonas, tal calentador puede comprender un anillo interior de grafito, molibdeno u otro material muy fusible, capaz de contribuir a regular la forma y posición de cualquiera de las interfaces sólido-líquido -29- y -30-, o de las dos. Se comprende que en el caso de que el calentador -28- sea una bobina de inducción de alta frecuencia, se produce en la zona fundida -27- cierta agitación inductiva. Esto puede convenir para batir la masa, o no convenir, por tender a alterar el equilibrio entre las fuerzas resultantes de la suspensión de la zona. Sin embargo, se ha comprobado que una provisión de frecuencia del orden de 5 megaciclos produce sólo ligera agitación, y es conveniente, aunque también pueden servir frecuencias más bajas, hasta del orden de 450 kilociclos.

Se comprende que el aparato representado se puede utilizar para cualquiera de los métodos de fusión por zonas conocidos en la especialidad. Estos comprenden la "nive-



229377

15

lación de zonas", cuya finalidad principal es la distribución uniforme de uno o varios solutos a lo largo de un trecho apreciable del lingote, o "refinación de zonas", donde se persigue sobre todo concentrar uno o varios solutos en determinado punto del lingote. La refinación de zonas consiste generalmente en pases repetidos de zonas de junto a un extremo a cerca del extremo opuesto del lingote, a razón de unos 6 mm. a 0,5 mm. por minuto. Detalles sobre longitud de zonas, número de pases, longitud del lingote, velocidad de marcha, efecto de los coeficientes de distribución de los componentes del sistema, etc., pueden encontrarse en "Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers", vol. 194, 1952, págs. 747 a 753.

15

Todo el conjunto tubular, que comprende el lingote -10-, el tubo de cuarzo -11- y los bloques terminales -12- y -13-, con elementos para mantener circulación de corriente eléctrica y una atmósfera conveniente dentro del tubo -11-, puede girar sobre su propio eje para conseguir una uniformidad mayor de la figura de la zona fundida y del calentamiento. En ciertos casos puede convenir que gire uno de los bloques terminales -12- o -13-, y mantener el otro fijo, y también producir cierto batido dentro de la zona fundida -27-.

25

Se ha observado que el efecto de calefacción I^2R de la corriente de suspensión I a través del lingote sirve para calentar éste hasta cierto grado. Se demostrará que en algunos casos basta este efecto de calefacción para fundir el material. Generalmente, si el metal es de los que conducen bien la electricidad, como aluminio, hierro, estaño, níquel, platino y titanio, la corriente suele no bastar

30



para fundir por sí misma el lingote. Sin embargo, la corriente de suspensión en tales condiciones substituye parte de la carga del calentador de zona.

5 Se ha visto que es posible emplear, para suspender una carga, corriente alterna de suspensión y flujo de campo reversible, si está en fase, sin componente continuo o constante. Si H e I están en fase, la fuerza reactiva resultante F se ejercerá en una dirección constante, aunque su valor oscilará entre cero y un máximo a dos veces la frecuencia de la corriente y del campo. Por eso se infiere que cuando hace
10 falta o conviene emplear corrientes alternas de suspensión y campos en fase, la frecuencia debe ser bastante elevada para que la inercia del sistema evite su hundimiento. Para ello han resultado adecuadas corrientes alternas de suspensión y campos reversibles, de una frecuencia de 60 ciclos por
15 segundo, aunque deben preferirse en general frecuencias mayores.

Aún cuando toda la descripción respecto al método de suspensión aquí considerado versa sobre un lingote horizontal y corrientes de suspensión y campos magnéticos también horizontales, debe entenderse que el proceso descrito no presenta tales limitaciones. El único requisito general es que la fuerza reactiva resultante de la acción recíproca entre la corriente de suspensión y el campo magnético tenga un componente que, en unión de las otras fuerzas estabilizantes manifiestas, baste para compensar cualquier fuerza o cualesquiera
20 fuerzas que tiendan a mover el material que ha de suspenderse. Cuando la única fuerza que propende a mover el material proviene de la gravedad, la fuerza reactiva debe tener un componente vertical hacia arriba, y no es necesario que
25 tenga un componente, en ninguna otra dirección, para superar

30

15 JUN



229377

fuerzas estabilizantes cualesquiera, como tensión superficial que tienda a impedir movimiento en tal dirección.

5 Aun cuando la fuerza que ha de vencerse provenga sólo de la gravedad, hay circunstancias especiales en las que conviene emplear un lingote inclinado respecto a la horizontal. Por ejemplo, durante fases repetidas en un refinador de zonas que actúe sobre un material con diferencia de densidad entre las fases sólida y líquida, el paso de las zonas se traduce en un pequeño transporte de material, que se acumula con cada paso. En el procedimiento de fusión simple por zonas, esto se puede superar inclinándose el lingote desde la horizontal hasta un ángulo que compense este movimiento de material. Véase "Journal of Metals" noviembre 1953, página 1441. En la fusión por zonas en suspensión, según se practica de acuerdo con este invento, el transporte de material se puede anular eficazmente de un modo análogo, siempre que haya bastantes factores de estabilización que impidan el movimiento del material suspendido a causa del componente no vertical de la fuerza reactiva. También se puede anular por tracción o impulsión de una o de ambas porciones sólidas del lingote, para mantener constante la sección transversal de la zona fundida.

10

15

20

25 Conviene que sea uniforme el flujo de campo magnético por todo el volumen de la zona, aunque las fuerzas restauradoras de la tensión superficial y la adherencia entre las fases líquida y sólida en la interficie puedan compensar variaciones de flujo. Para lingotes del orden de 1 ó 2 cm. de diámetro o menos, son tolerables variaciones de flujo del orden de 20%, suponiendo una tensión superficial del orden de 500 dinas por centímetro o más. A medida que

30 la razón entre masa y área de superficie de la zona suspen-

15 JUN 1953



229377

dida aumenta, disminuye la desviación máxima admisible de la uniformidad del flujo de campo.

Las figuras 3A, 3B y 3C ilustran tres sencillos recursos mecánicos para obtener un campo más aproximadamente uniforme a partir de determinadas caras polares. Se ha comprobado que para superficies polares planas paralelas y opuestas, la intensidad de campo alcanza su máximo entre los centros de las caras, siempre que la composición de las piezas sea casi constante a través de las caras. En cada uno de los ejemplos de las figuras 3A, 3B y 3C, las caras paralelas se han sustituido por configuraciones en las cuales el entrehierro disminuye horizontalmente hacia los extremos de aquéllas, a fin de aumentar las líneas de fuerza en esa dirección y compensar el efecto antes mencionado.

En la figura 3A, las piezas polares -40- y -41- se afinan o configuran de otro modo para producir ranuras verticales en V en las caras -42- y -43-.

En la figura 3B, las piezas polares -50- y -51- se configuran con las caras -52- y -53- curvadas hacia dentro, lo cual produce un entrehierro que disminuye en longitud desde el centro a los extremos horizontales de la cara.

La figura 3C expone piezas polares -60- y -61- recortadas por las superficies -62- y -63-, y que presentan nervios verticales -64- y -65-, lo cual produce igualmente un entrehierro disminuido por los extremos de las caras, así como una intensidad de campo más aproximadamente uniforme a través de las caras del imán.

Excepto donde se indique lo contrario, el resto de esta memoria se refiere a métodos de suspensión en los cuales la única fuerza no compensada que ha de afrontarse es efecto de la gravedad. También debe entenderse que las re-

15 JU



- 18 -

229377

ferencias a la corriente de suspensión I y a la intensidad de campo H afectan sólo a los componentes de las cantidades situadas en un plano horizontal, con I y H formando un ángulo de 90 grados si se mira hacia abajo. Puede haber otros componentes de estos valores, de modo que la fuerza reactiva F opuesta a la de gravedad forme sólo parte de la fuerza reactiva total. Se supone que componentes de la fuerza reactiva total en una dirección distinta de la vertical hacia arriba son anulados eficazmente por la tensión superficial y otras influencias estabilizantes.

Aunque se indica en general un campo uniforme en la dirección vertical normal al eje común de las caras del imán, cuando sea evidente la existencia de inestabilidades en el sistema que tiendan a provocar un cambio en la posición vertical del material suspendido, puede introducirse una influencia estabilizante adicional recurriendo al uso de un campo magnético graduado. Tal campo debe disponerse de modo que el componente horizontal de intensidad magnética normal a la corriente de suspensión disminuya hacia arriba en la región que ocupa el material suspendido. Si en semejante campo, la inestabilidad causada por variar la corriente de suspensión, la intensidad magnética o la masa, tiende a hacer caer el material suspendido, penetrará en una parte del campo donde la intensidad es mayor que en su posición original. El material suspendido seguirá cayendo hasta que la mayor intensidad de campo aumenta la fuerza reactiva lo suficiente para contrarrestar la fuerza descendente acrecentada. En cambio, si el desequilibrio es tal que produzca una fuerza reactiva F superior a la requerida para oponerse al efecto de gravedad del material suspendido, el componente ascendente de F que resulta hará subir el ma-

15 JUN 1953



229377

terial suspendido hasta que la intensidad decreciente del campo vuelva a equilibrar las fuerzas.

5 Un campo graduado del tipo descrito existe siempre hasta cierto punto en el campo producido por caras paralelas planas del imán. Es decir, en un campo producido por tales caras, la potencia del campo suele ser máxima a lo largo de la línea que une los centros de las caras, suponiendo que la composición del imán sea uniforme y no haya líneas arbitrarias de fuerza, y disminuye al alejarse de esta línea, paralelamente a las caras. Por consiguiente, si el material suspendido se dispone así por encima del centro de las caras del imán, una zona descendente lo pondrá bajo la influencia de un campo de intensidad creciente, mientras que una zona ascendente producirá disminución de la fuerza reactiva F.

15 Si se advierte que las fluctuaciones de la corriente de suspensión o del flujo de campo magnético son demasiado grandes para compensarlas con el gradiente de flujo vertical que existe por encima del centro de caras polares paralelas planas, puede aumentarse más la inclinación del gradiente. Los métodos de aumentar este gradiente comprenden el empleo de campos producidos hacia arriba por estructuras magnéticas duplex, con imanes más débiles o entrehierros mayores, o con unos y otros; caras polares no paralelas dispuestas de modo que el entrehierro aumente hacia arriba, o derivaciones magnéticas para desviar parte de las líneas de flujo magnético por encima del centro del material suspendido. Como en todos los métodos aquí descritos, debe entenderse que el campo magnético se puede producir con imanes permanentes, con electroimanes, o con una combinación de ambos.

30 Las figuras 4A, 4B y 4C ilustran tres modos de producir campos no uniformes con intensidad de campo magnético



229377

15

5

10

15

20

25

30

horizontal que disminuye bruscamente hacia arriba. En la figura 4A, las caras -70- y -71- de las piezas polares -72- y -73- del imán están cortadas o configuradas de modo que se forma un entrehierro gradualmente mayor, y una intensidad de campo que disminuye en consecuencia hacia arriba. Esto se indica esquemáticamente por la apertura de las líneas -74- de flujo magnético en sentido ascendente. Se indica en sección transversal una zona fundida -75- en suspensión. Debe advertirse que el gradiente del campo tiene por efecto alargar horizontalmente la sección transversal de la zona.

En la figura 4B se produce un campo graduado casi vertical inclinando las piezas polares -80- y -81- de modo que formen con la horizontal un ángulo que deje las caras polares -82- y -83- en forma de "V". Según se expone, el ángulo de las citadas caras se aproxima a 90 grados. La distancia creciente hacia arriba entre las líneas de fuerza -84- indica una intensidad decreciente de campo en dirección ascendente. La zona suspendida aparece como un óvalo -86-, que es la figura adquirida por aquélla en un campo graduado.

El aparato de la figura 4C se vale de piezas polares -90- y -91-, con caras paralelas planas -92- y -93-, y muestra el uso de una derivación que puede ser de hierro o de cualquier otro material ferromagnético. La derivación -94-, en forma de U invertida o de semicírculo, se dispone con los extremos abiertos de la U aproximadamente a nivel del remate de la zona suspendida -95-. Como la derivación -94- presenta menos reluctancia magnética a las líneas de fuerza -96-, disminuye la intensidad de campo H dentro de los límites de la U y por encima de la zona -95-.

Además de proporcionar estabilidad a una zona suspendida contra el movimiento vertical producido, por ejemplo, por

15 JU



229377

vibración mecánica o por variación de la corriente suspen-
siva o de la intensidad de campo H, los campos representados
en las figuras 4A, 4B y 4C tienden a aplanar las zonas. Por
esta razón, una zona producida desde una varilla de sección
5 transversal circular dentro de tal campo graduado tiende a
asumir una forma como la de la zona -75- de la figura 4A ó
la zona -86- de la figura 4B. Aunque esto puede ser incon-
veniente si interesa mantener una sección transversal circu-
lar, hace posible una menor distorsión durante la fusión y
10 el reenfriamiento, cuando la dimensión del lingote en un pla-
no horizontal es mayor que a lo largo del eje vertical, como
en el caso de una sección transversal rectangular. Es evi-
dente, pues, que el aparato de suspensión se puede proyectar
de modo que cumpla la finalidad secundaria de deformar la
15 sección transversal de la zona fundida o de mantener la con-
figuración en sección transversal del lingote sólido, para
producir un lingote final de determinada forma. Las varia-
ciones de posición y figura de las caras del imán que provo-
can cambios de flujo en el campo de suspensión, para modelar
20 la sección transversal definitiva del material tratado, son
obvias para los entendidos en la materia.

Debe señalarse que los campos de las figuras 4A, 4B
y 4C, al aumentar la estabilidad vertical de la zona suspen-
dida, tienen el efecto, generalmente adverso, de introducir
25 un tipo de inestabilidad que no se presenta en un campo uni-
forme. Como las líneas de flujo magnético se curvan hacia
abajo a ambos lados del lingote, visto en sección transver-
sal, se introduce una inestabilidad horizontal, de modo que
si la zona suspendida se aparta accidentalmente de la línea
30 media hacia un lado, tiende a seguir en esa dirección. Si
la curvatura descendente es excesiva, la pérdida de estabi-

15 JUN



229377

lidad lateral así introducida puede anular la ganancia en estabilidad vertical obtenida graduando el campo.

En la práctica, a base de estas consideraciones, conviene una graduación vertical de la intensidad de campo H resultante de disminuir en sentido vertical por el centro de la zona suspendida alrededor de 25 a 50% de la distancia de un espesor de zona en esa dirección.

Hasta ahora, los métodos de suspensión de este invento se han descrito ante todo en términos propios de los métodos de fusión por zonas. Aunque es cierto que la suspensión electromagnética es muy útil en tales procedimientos, las ventajas de una masa fundida en suspensión son también apreciables en otros tipos de operaciones.

Para la suspensión electromagnética basta que el material que ha de suspenderse tenga una resistividad suficientemente baja a la temperatura de régimen para permitir el paso de una corriente de suspensión adecuada. Se ha visto que el empleo de estructuras magnéticas fuertes, pero comúnmente disponibles, requiere el paso de corrientes de suspensión mínimas nada más. En realidad, para temperaturas de régimen razonables, puede afirmarse que los únicos materiales con los que los procedimientos descritos pueden fallar son los dotados de resistividad superior a unos 500 ohm-cm. a la temperatura de régimen. Para operar de acuerdo con los principios de este invento, se necesita además que esté en suspensión una masa de material líquido en contacto íntimo con una masa de material sólido, al menos por una superficie. En las industrias del metal y en otras se conocen muchas operaciones de transformación en las que se cumplen estos requisitos.

Siempre que en la elaboración de un material que no sea aislante se necesite mantener una masa de líquido en con-

15 JUN



- 23 -

377

5 tacto con una masa de sólido, sean o no del mismo sistema
químico ambas fases, con tal que una de ellas moje a la otra,
se pueden aplicar los procedimientos de suspensión. Estos
métodos son valiosos cuando, por razones que conocen los en-
tendidos en estas materias, conviene evitar el contacto del
material líquido con las paredes de un crisol u otro reci-
piente. Esto puede convenir para que el material de las pa-
redes del crisol no envenene ni contamine de ningún modo el
material suspendido, y se evite así un agrietamiento resul-
tante de expansión o contracción producidas por fusión o en-
friamiento del material tratado, o bien imperfecciones cris-
talinas en un material solidificado de una fundición, origina-
das de otro modo por una pared del crisol.

15 Un objetivo común de la industria de los metales es
la obtención de un lingote sólido, sin poros, a partir de me-
tal muy puro, como titanio, que puede estar en forma de polvo,
de glóbulos finos o de pequeños cristales. A veces se uti-
liza la concreción, pero a menudo resulta porosa o quedan en
los poros sustancias que contaminan la superficie. Se ha
20 aplicado la fusión con arco en un recipiente de cobre refri-
gerado con agua, pero esto requiere un gran consumo de fuer-
za, y aparatos complejos. Además, la fusión con arco ocasio-
na desperfectos en los recipientes de cobre.

25 En el aparato de las figuras 5A y 5B puede practicar-
se un método de fusión de polvo para formar un lingote só-
lido con ayuda de una suspensión electromagnética.

30 El aparato de las figuras 5A y 5B se parece al de la
figura 2 en sus líneas generales, pero difiere del mismo en
cuanto a la naturaleza de la carga. En este aparato, la carga
-100- es un conglomerado en forma de barra larga. Como en el
aparato de la figura 2, la carga -100- está contenida dentro



1956

229377

de un tubo -101-, que puede hacerse de cuarzo u otro mate-
rial refractario, y que se encaja en bloques terminales -102-
y -103- por medio de empaquetaduras -104- y -105-. Estas
empaquetaduras pueden ser de caucho a la silicona o de otro
5 material de empaquetadura corriente, que resista las tempera-
turas de régimen y compense cualquier imperfección entre las
superficies de apoyo del tubo -101- y de los bloques termina-
les -102- y -103-. Estos bloques descansan sobre montantes
-106- y -107-, que cabalgan a su vez sobre una pieza como el
10 carro -108-, que se mueve libremente y hace pasar progresi-
vamente la carga a través de un calentador. En actividad, el
calor suministrado por el calentador -109- forma la zona fun-
dida -110-. Esta zona queda suspendida por la fuerza reac-
tiva resultante de la acción recíproca entre el campo magné-
15 tico producido por las piezas polares magnéticas -111- y -112-
y la corriente de suspensión I que se hace pasar por la carga
al imprimir una tensión a través de los electrodos -113- y
-114-. El material sólido remanente -115- es material de
la carga -100- que ha pasado por la fase fundida -110- y se
20 ha solidificado. Lo mismo que en el aparato de la figura
2, dos tubos de admisión y salida de gas, -116- y -117-, se
disponen en los bloques terminales -102- y -103-, respecti-
vamente, a fin de mantener una atmósfera conveniente, móvil
o estacionaria, dentro del tubo de cuarzo -101-, o de poder
25 evacuar la cámara. En este último caso, se tapará la admi-
sión -116- o la salida -117-, por lo general.

Cuando funciona el aparato de las figuras 5A y 5B,
la carga -100- puede pasarse con bastante rapidez, a razón
de unos 25 a 250 mm. por minuto, por el calentador -109-,
30 que puede ser una bobina térmica de inducción. Si interesa
obtener una cristalización perfecta, o evitar una gran des-

15 JUN 1955



220377

viación, es preferible determinar los ritmos de enfriamiento con referencia al tipo de fusión por zonas.

Asimismo, el material se puede fundir y enfriar por trozos discretos de zona, por ejemplo, haciendo avanzar la carga después de fundida cada porción, o bien es posible disminuir la temperatura dentro del horno después de cada fusión parcial. Se consigue un funcionamiento casi continuo conectando trozos sucesivos de conglomerado.

La figura 6 ilustra otro método de fusión, en el que un material fundido queda en suspensión por la fuerza reactiva resultante de la acción recíproca entre un campo magnético y una corriente que pasa por la masa. El aparato representado se compone de bloques terminales -120- y -121-, uno de ellos, -121-, mantenido en posición fija, y el otro, -120- asociado a una pieza móvil como el carro -122-. En actividad, se sujeta un primer lingote -123- por sus extremos en los bloques -120- y -121-. El lingote -123- se sujeta a la envoltura -124- mediante un cierre fijo -131- y otro corredizo -132-, y en torno al lingote se dispone un calentador -125- y una estructura polar magnética, no representados, pero similares a los de la figura 5A.

Para comenzar la operación, se aplica una tensión a través de los electrodos -126- y -127- en contacto con el lingote -123-, y se forma la zona fundida -128- por intercambio térmico con el calentador -125-. Dentro de la envoltura -124- se mantiene una atmósfera conveniente por medio de la admisión -129- y la salida de gas -130-. Una vez formada la zona fundida -128-, se mueve el carro -122- hacia la izquierda, para que arrastre la parte sólida del lingote -123- sujeta en el bloque -120-. Al mismo tiempo, se introduce por la admisión -134- material en polvo, como se in-



229377

dica por la flecha -133-, con rapidez adecuada para mantener aproximadamente constante el material en la zona fundida -128-.

5 Puede disponerse una cavidad o abertura debajo de la zona fundida -128-, para evitar que se acumulen partículas no fundidas en la zona. También es posible introducir el material en forma de varilla o alambre concrecionado, pero en este caso hay que tomar precauciones para mantener constante la corriente de suspensión. La adherencia entre el material
10 fundido de la zona -128- y el material sólido de la varilla de alimentación ayudará a estabilizar la zona en su sitio contra un cambio de corriente de suspensión a causa de una variación en la red eléctrica.

15 Si en el aparato de la figura 6 ha de emplearse una alimentación granulada, puede convenir una zona de sección transversal rectangular u oval, que así presenta una superficie mayor a la carga. En relación con las figuras 4A, 4B y 4C se han descrito configuraciones de imanes que producen tales formas de zona.

20 El aparato de las figuras 7A y 7B puede utilizarse para aleación u otro proceso que implique una fusión en la cual debe evitarse contacto entre la fundición y las paredes del crisol. En semejante método, se sujeta una varilla -140- de material, a los bloques de fijación tales como los
25 -141- y -142-, y se hace pasar corriente por la barra -140- aplicando un gradiente de tensión a través de los electrodos -143- y -144-, en contacto eléctrico con las pinzas -141- y -142-, respectivamente. La porción de varilla -140- sujeta entre las pinzas -141- y -142- se funde mediante un calentador no representado, o simplemente por medio del calor I^2R
30 producido por el paso de corriente a través de la varilla -140-

15 JUN 1956



229377

En cualquiera de ambos casos, la región fundida queda en suspensión por la fuerza reactiva resultante de la acción recíproca entre la corriente de suspensión y el campo magnético producido por elementos magnéticos no representados. Si ha de agregarse un componente, es posible hacerlo por mediación de una tolva como la -134- de la figura 6, o puede ponerse en contacto con la varilla -140-. Al funcionar el aparato, se produce la fundición y se enfría o solidifica en su sitio. Generalmente conviene enfriar las pinzas -141- y -142-, para mantener sólidas las porciones terminales de la varilla -140-.

Empleando pinzas -141- y -142- provistas de medios para despedir varillas sólidas y para introducir otras nuevas en ellas automáticamente, es posible preparar en gran escala una serie de tales aleaciones.

Un ejemplo de aleación en cuya producción resulta útil una técnica como la descrita, consiste en níquel muy puro con unas décimas por 100 de magnesio o de aluminio. Aleaciones de tales materiales, preparadas en crisoles, se contaminan con impurezas de las paredes del recipiente, o por el material de estas paredes, a las elevadas temperaturas de fusión de las aleaciones. Tales aleaciones interesan para obtener elementos que han de usarse en lámparas termoiónicas o de vacío intenso.

A base de la experimentación y de una amplia teoría fundada en ella, es posible generalizar respecto a la forma y dimensiones de zonas suspendidas estables. Las fuerzas de tensión superficial son las principales fuerzas estabilizantes que mantienen la forma o la posición de una zona suspendida. Un desequilibrio entre la gravedad y la fuerza de suspensión, o una perturbación que temporalmente altere la forma de la zona, acarrea un aumento de superficie de la misma. Se oponen

15 JUN 6



229377

a tal aumento las fuerzas de tensión superficial que tienden a mantener reducida a un mínimo tal superficie.

5 Una zona suspendida se considera estable cuando una alteración de magnitud prevista en la forma queda anulada por la acción restauradora de fuerzas de tensión superficial. Otras influencias estabilizantes ya reseñadas tenderán a introducir un factor complementario de seguridad. La adherencia entre las fases sólida y líquida puede traducirse en la suspensión de una zona fundida, que, de acuerdo con estas generalizaciones, no sería estable basada únicamente en fuer-
10 zas de tensión superficial. Con valores de $\frac{l}{d}$ mayores, es posible contener el volumen líquido en dos secciones esféricas distintas, una en cada interficie, de modo que la superficie total sea menor de la correspondiente a un cilindro.
15 dro.

Una zona fundida que constituye un cilindro circular de longitud l y diámetro d en la interficie sólido-líquido, es estable si $\frac{l}{d}$ es menor que 3,14 o π , aproximadamente. Una zona abombada o binconvexa, que corresponda poco más o menos a una figura de revolución obtenida por rotación de un arco de círculo en torno al eje del lingote, es estable para valores de $\frac{l}{d}$ mucho mayores de 3,14. Una zona bicóncava en la que el diámetro mínimo de sección transversal no sea menor de una mitad del diámetro en la interficie sólido-líquido, es estable para valores de $\frac{l}{d}$ hasta 1,5, aproximadamente.
20
25

Una zona suspendida determinada es más estable con valores de $\frac{l}{d}$ inferiores. Es decir, que el efecto de las fuerzas restauradoras de tensión superficial se hace mayor a medida que disminuye $\frac{l}{d}$.
30

Parece haber un máximo de l posible para una subs-

15



229377

tancia dada, aún con valores $\frac{1}{2}$ muy pequeños. Se calcula que es del orden de 75 mm. para metales de moderada densidad y tensión superficial. Se ha deducido una relación teórica para el valor de la longitud máxima de la zona estable, l_{\max} , empleando supuestos simplificativos, como sigue:

$$l_{\max} = (\text{constante}) \times (\sqrt{\frac{\alpha}{\rho}}) \times (\text{factor de forma}) \quad (3)$$

donde α = tensión superficial en dinas/cm; ρ = densidad en gramos/cm³, y l_{\max} , longitud en centímetros. La constante en la ecuación (3) es teóricamente alrededor de 0,2, pero en la práctica se han obtenido valores de l_{\max} que dan un valor más alto para la constante.

La figura 8 expone, vistas por arriba, un par de caras de piezas polares magnéticas configuradas de modo que se suspenda una zona abombada o biconvexa. Las piezas polares -150- y -151- tienen caras cuneiformes -152- y -153-, respectivamente. Como el entrehierro entre las caras polares -152- y -153- disminuye horizontalmente desde los extremos a los centros de las caras, la intensidad magnética del campo resultante queda graduada de modo análogo, de modo que la intensidad máxima está en la línea situada entre los centros de las dos caras -152- y -153-, y desciende rápidamente a medida que se acerca en sentido horizontal al extremo de las caras. Como la corriente que pasa por el lingote -154- es forzosamente constante en toda su longitud, resulta que la fuerza reactiva F es mayor en la posición del lingote que corresponde a los centros de las caras -152-, -153-. Tal fuerza es capaz de soportar una zona fundida -155- de sección transversal mayor en la porción que corresponde a la región de mayor flujo magnético.

Para una forma dada de zona, las fuerzas restauradoras, y con ello la estabilidad de conjunto, serán mayores pa-



228377

ra materiales de mayor tensión superficial y/o menor densidad. Las generalizaciones expuestas se basan sobre una tensión superficial aproximada de 500 dinas por centímetro. Los valores de la tensión superficial son generalmente algo mayores que el citado, por ejemplo, 500 dinas por centímetros para el estaño, 1000 para el cobre, 1500 para el hierro y 700 para el silicio. A continuación se exponen otros datos generales relativos a la estabilidad de una zona suspendida.

La variación permisible del componente horizontal de la intensidad magnética H a lo largo de una zona suspendida de sección transversal uniforme depende del diámetro y la longitud de la zona, y de la densidad y tensión superficial del material que la compone. Suponiendo que el valor máximo del componente horizontal de la intensidad de campo, H_x , esté en el centro de la zona, el cambio por 100 tolerable de H_x , ΔH_x , entre el centro y los extremos se calcula como sigue:

Para $d \approx 12,7$ mm.,

$l \approx 25,4$ mm.

$\Delta H_x \approx 15\%$

Para $d \approx 25$ mm. aproximadamente,

$l \approx 38$ mm. aproximadamente.

$\Delta H_x \approx 4\%$ aproximadamente.

Para una zona biconvexa como la descrita en relación con la figura 8, el valor requerido de H , en cualquier posición a lo largo del eje de la zona suspendida, es directamente proporcional al área de sección transversal de la zona en esa posición.

En general, deben evitarse vibraciones del aparato, porque pueden afectar la forma de la zona y producir en



229377

5

10

consecuencia inestabilidad. Las fuerzas reactivas producidas por la acción recíproca entre las corrientes inducidas en el lingote por calentamiento de inducción directa y las de la bobina térmica pueden agitar o deformar la zona. Para reducir este efecto al mínimo, conviene emplear longitudes menores de zona, del orden de menos de dos veces el espesor. Las pulsaciones en la amplitud de la potencia de calentamiento por inducción en alta frecuencia, a frecuencias hasta de unos 360 ciclos por segundo, se deben evitar, o al menos reducir al mínimo, ya que pueden ocasionar una vibración resonante de la zona que provoque inestabilidad.

15

20

Se ha comprobado que el calentamiento por inducción tiende a disminuir el área de la sección transversal por el centro de una zona suspendida. Este efecto se puede anular substancialmente disponiendo espiras auxiliares en direcciones opuestas a cada extremo de la bobina. Un carrito de inducción típico de cuatro vueltas y 63,5 mm. de diámetro, con un espacio de 4,7 mm. entre centros, puede contener con este fin dos vueltas auxiliares en sentido opuesto, con 8 mm. de espacio entre centros a cada extremo.

25

30

Las normas para el diseño de redes filtrantes para corrientes alternas de alimentación son bien conocidas y no se exponen aquí. Bastan para el diseño de tales filtros los datos generales ya indicados sobre la proporción de estabilidad tolerable en ciertas condiciones de funcionamiento, además del conocimiento del valor requerido de corriente de suspensión. En la práctica se ha visto que una red filtrante compuesta de un rectificador de 200 amperes, con una capacitancia de 100.000 microfarads en paralelo con el rectificador y una inductancia de 150 microhenrys en serie con la

15 JU



000377

carga, es suficiente para reducir una corriente pulsatoria continua de 50%, en una corriente alterna de 60 ciclos por segundo, a menos de 5% del valor de la corriente continua. Empleando tal disposición, se ha obtenido una corriente de suspensión de 20 a 200 amperes.

5

A continuación se describe una dificultad con que se tropieza en los procedimientos de suspensión conforme a este invento. En general, la resistividad eléctrica de un material dado varía de la fase sólida a la líquida. Para la mayoría de los metales, la relación R entre la conductividad eléctrica en el sólido y la que existe en el líquido es mayor de 1; para el estaño, es alrededor de 2,1; y para ciertos metaloides, como antimonio, bismuto y semiconductores, R es menor de 1.

10

15

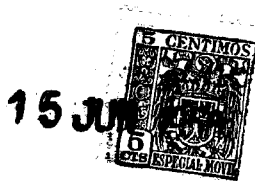
Si se funde una masa sólida en un campo de suspensión por toda su sección transversal, es necesario verificar con cuidado la corriente de suspensión o el campo magnético para mantener constante la fuerza reactiva. Si es grande el diámetro o la densidad de la masa de material en tratamiento, o baja la tensión superficial del líquido, la dificultad puede ser grave. Sin embargo, este efecto puede dominarse según se describe.

20

25

Es evidente que, definiendo R como queda expuesto, el campo de suspensión se puede mantener constante mientras se cambia algo la corriente I de un valor RI_0 en el lingote sólido a un valor definitivo I_0 , cuando está fundida por completo la sección transversal del lingote. Analíticamente, si se funde un trozo uniforme del lingote en una tira que se interna en la sección transversal del mismo, la corriente I, en función de f , fracción fundida de la sección transversal, puede darse por la ecuación:

30



229377

$$I = I_0 [1 + R (1 - f)] \quad (4),$$

donde I_0 indica la corriente de suspensión calculada para la zona enteramente fundida.

5 Tal operación se verificará eléctricamente midiendo la resistencia entre dos puntos a uno y otro lado de la zona de fusión, y empleando estos datos para planear el valor de I_0 . También es posible verificar el flujo de campo H , conforme a la misma relación, de modo que el producto de I y H permanezca constante.

10 La dificultad mencionada se puede moderar soportando la porción fundida a un valor fijo de I , y retirando el soporte una vez formada la zona fundida, por ejemplo, fijando simplemente la posición del soporte en relación con el lingote, y apartando la zona por el procedimiento usual de fusión por zonas.

15 A continuación se exponen ciertas generalizaciones respecto a las clases de sustancias que pueden elaborarse de acuerdo con el presente invento.

20 Las condiciones para suspensión magnética de zonas se expresan por la siguiente ecuación,

$$H_j \approx 10^4 \rho$$

25 donde H = intensidad del campo magnético en oersteds; J = densidad de corriente en amperes por cm^2 ; ρ = densidad en gramos por cm^3 .

En la ecuación (5) puede introducirse la siguiente definición de J :

$$J = \frac{\sigma V}{l} \quad (6)$$

30 donde σ = conductividad eléctrica media en condiciones rea-



229377

les de funcionamiento, en ohms⁻¹-cms⁻¹; l = longitud del lingote entre electrodos de corriente, en cms.; V = tensión aplicada, en voltios.

Combinando las ecuaciones (5) y (6), se tiene:

5

$$\frac{\sigma}{\rho} = 10^4 \frac{l}{HV} \quad (7).$$

10

Los parámetros σ y ρ determinan si una substancia puede tratarse por el método de este invento. Introduciendo en la ecuación (7) valores máximos razonables de H y V , y una longitud l mínima razonable, se obtiene un valor mínimo de $\frac{\sigma}{\rho}$. Si ha de tratarse con buen resultado una substancia conforme a este invento, debe igualarse o rebasarse este valor mínimo.

15

Para este fin, se supone que un valor máximo razonable de la intensidad de campo es de 25.000 oersteds. Tal intensidad se puede obtener empleando imanes permanentes Alnico o electroimanes en una longitud de entrehierro del orden de 25 mm. Pueden obtenerse campos más potentes de los supuestos utilizando solenoides con núcleo de aire asociados a corrientes desusadamente grandes. El empleo de tales imanes dará por resultado un valor mínimo efectivo más bajo de la relación $\frac{\sigma}{\rho}$, y permitirá así suspender una escala más amplia de materiales.

20

25

Se supone una tensión máxima razonable aplicada de 400 volts, si bien advirtiéndose que esta tensión no representa un límite definitivo.

Igualmente se supone una longitud mínima de 2,5 cm. entre electrodos L , si bien, en general para metales, se prefiere una L_{\min} aproximada de 10 cm.

30

Introduciendo estos valores en la ecuación (6), resulta:

229377

15 JUL



$$\frac{\sigma}{\rho_{\min}} \approx \frac{(10^4)(2,5)}{(25000)(400)} \approx 0,0025.$$

5 Para metales, la densidad máxima ρ encontrada viene a ser de 23 gramos por cm^3 . Por consiguiente, la conductividad mínima σ es de alrededor de $0,057 \text{ ohms}^{-1}\text{-cm}^{-1}$ para el metal más denso. Se advierte fácilmente que pueden tratarse conforme al invento todos los metales, pues los valores de σ para metales caen dentro del margen comprendido entre 10^3 y $10^5 \text{ ohm}^{-1}\text{-cm}^{-1}$, aproximadamente.

10 Para semiconductores, el valor máximo de ρ es de unos 10 gramos por cm^3 . Por tanto, el valor mínimo requerido de σ es de alrededor de $0,025 \text{ ohm}^{-1}\text{-cm}^{-1}$, o, expresado en términos de resistividad, el material sometido a tratamiento debe tener una resistividad no mayor de unos 40 ohm-cm . La mayoría de los semiconductores, especialmente si son algo impuros, cumplen este requisito aún sobre la base de medición a temperatura ordinaria. Además, como se ha
15 indicado antes, el promedio de conductividad para un semiconductor, en condiciones de régimen próximas al punto de fusión del semiconductor, puede ser de órdenes de magnitud por encima del valor a la temperatura ambiente.

20 En cuanto a sales y soluciones iónicas, las densidades máximas encontradas son de unos 4 gramos por cm^3 , de modo que el valor mínimo correspondiente de σ es igual a $0,01 \text{ ohm}^{-1}\text{-cm}^{-1}$, poco más o menos.

25 Si σ es bajo para el material en tratamiento, a base de los opuestos anteriores, la potencia disipada en el lingote puede ser suficiente para fundirlo por entero, a menos que se enfrían las porciones sólidas. Por ejemplo,
30 el calor I^2R necesariamente producido en un lingote de 10 cm. de longitud y 1 cm^2 de superficie en sección transver-



229377

sal, con un valor de σ igual aproximadamente a $0,1 \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, a la densidad mínima indicada de corriente de 4 amperes por cm^2 , es igual a unos 1600 vatios. Tal cantidad de calor puede disiparse fácilmente de un lingote de la geometría indicada, empleando medios de refrigeración corrientes.

Seguidamente se resumen algunas de las ventajas conseguidas al proceder de acuerdo con los métodos de suspensión que se dejan descritos:

1.- La fuerza de suspensión es independiente de la longitud de la zona, pues F es la fuerza elevadora por unidad de longitud del lingote. En realidad, toda la porción del lingote, sólida o fundida, que queda en la región de campo uniforme, se soporta de modo que importa poco si el material incluido en el campo está fundido o sólido.

2.- Intervienen fuerzas de tensión superficial para mantener constante la posición de la zona fundida en línea con las regiones sólidas, y ayudan a evitar vibraciones debidas, por ejemplo, a ligeras variaciones en potencia de campo en el volumen de la zona, o a pequeñas desviaciones del campo en dirección vertical. Si la zona fundida es corta, las fuerzas de tensión superficial impedirán que un campo no uniforme desfigure el lingote. Por consiguiente, mientras que la fuerza reactiva F es la que más influye para vencer el efecto de gravedad de la masa suspendida, las fuerzas de tensión superficial proporcionan una influencia estabilizante que reduce al mínimo el movimiento o la distorsión de la zona.

3.- La corriente por unidad de superficie en toda la sección transversal y longitud de la zona es constante para zonas de superficie uniforme de sección transversal en

45 JUN



229377

toda su longitud. Esto distribuye efectivamente la fuerza de suspensión, sobre una base atómica, por todo el volumen de la zona. Por consiguiente, siempre que el lingote primitivo tenga una sección transversal uniforme, la figura de la zona fundida no cambia por obra de la corriente de suspensión. Esto constituye una ventaja sobre métodos de levitación conocidos en la técnica, fundados en el empleo de corrientes parásitas inducidas en la masa fundida.

4.- Otro factor estabilizante que compensa las vibraciones verticales de la zona fundida se introduce al amortiguar las corrientes parásitas el campo H aplicado. El movimiento de una zona suspendida a través de un campo magnético da por resultado inducir corrientes parásitas en una dirección tal que los campos de estas corrientes se oponen al movimiento.

5.- La regulación o el ajuste de la fuerza de suspensión se consigue fácilmente sin afectar a la capacidad térmica en la zona. Medios reguladores son los de variar el entrehierro apartando las piezas polares, o aproximándolas, variar la intensidad de campo cargando la corriente en un electromagneto de corriente continua, o en un arrollamiento auxiliar de un imán permanente, o cambiar el valor de la corriente de suspensión. Se ha advertido que cuando el flujo de corriente I es apreciable, una variación de I va acompañada de cambios del volumen de la zona fundida, y con ello del ritmo del movimiento interfacial, que puede ser inoportuno en ciertas operaciones de fusión por zonas y en otros casos.

Se ha comprobado que incluso una capa muy delgada de óxido puede aumentar mucho la longitud estable de las zonas. Por ejemplo, en estaño, metal de tensión superfi-

15 JUN



229377

cial relativamente baja, se han mantenido zonas fundidas de 61 mm. de longitud en una varilla de 8 mm. de diámetro, al aire, empleando un H bastante uniforme, proporcionado por un electroimán con caras polares de 102 mm. de diámetro y un espacio de 83 mm., y variable en menos de 6% por toda la longitud de la zona. Las longitudes máximas estables en una atmósfera protectora para el estaño son de 25 mm. aproximadamente.

Aunque el invento se ha descrito con referencia a la suspensión de material en atmósfera de una substancia gaseosa o en un vacío, los procedimientos aquí descritos se pueden realizar en una substancia más pesada, tal como un líquido. Este líquido puede reducir efectivamente la densidad de la zona suspendida, y hacer así estables longitudes mayores de zona.

El procedimiento de suspensión del invento es aplicable, desde luego, a la suspensión simultánea de dos o más zonas o regiones líquidas. Por ejemplo, en la refinación de zonas múltiples es posible suspender todas las zonas fundidas del lingote sólido. En tal procedimiento, un solo campo magnético puede abarcar dos o más zonas, de modo que se suspenden también en realidad la región o las regiones sólidas comprendidas entre las zonas fundidas.

En la descripción que antecede, el término "zona" se refiere no sólo a los métodos de fusión por zonas, sino también a todas las masas suspendidas de material líquido. Se han sugerido otros usos del procedimiento de suspensión, y otros más se harán patentes.

-----:: N O T A ::-----

15 JUN 1968



229377

Se reivindica como objeto de esta patente:

5 1. - Procedimiento para mantener suspendido por medios electromagnéticos un material líquido o fundido que moja una superficie, y se halla bajo la influencia de una fuerza que tiende a desplazarlo; caracterizado porque se hace pasar una corriente por una porción de la masa líquida, y se aplica a través de una porción de esta masa líquida un campo magnético tal que se produzca sobre un plano normal a dicha fuerza, un componente de campo y un componente de corriente, el primero en ángulo de 90 grados con el segundo, medido en dirección contraria a la de avance del reloj y mirando en el sentido de influencia de dicha fuerza, para engendrar una segunda fuerza, reactiva con relación a los citados componentes de campo y de corriente, y opuesta a la fuerza, primeramente mencionada, que tiende a desplazar la masa líquida.

10 2. - Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque cuando la primera fuerza proviene principalmente de la gravedad, la fuerza reactiva a los componentes de campo y de corriente es en esencia igual a la fuerza que tiende a desplazar la masa líquida.

15 3. - Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el citado material comprende una masa sólida; caracterizado porque se produce por lo menos una zona fundida a través de una porción de la referida masa, fundiendo el material de la masa sólida en una interficie sólido-líquido, y enfriando o solidificando el material de la zona fundida en una interficie sólido-líquido; y porque el componente de campo y el componente de corriente están en un plano horizontal, y la zona fundida se halla en todo momento en contacto con la masa sólida.

15



229377

5

4.- Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque la masa sólida comprende una masa granular compacta, de la cual se produce un cuerpo cristalino, y las interfaces sólido-líquido primera y segunda avanzan en una sola dirección.

10

5.- Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque se introduce material de carga en la región fundida, y se enfría el material fundido por lo menos en una interficie entre la región fundida y una porción del cuerpo sólido, con tal ritmo que la cantidad de material fundido en la zona fundida se mantiene aproximadamente constante.

15

6.- Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado porque al menos una porción de la masa de material se funde primero y se solidifica después, para proveer una superficie de material fundido en todo momento durante la operación.

20

7.- Procedimiento para mantener suspendido, por medios electromagnéticos un material líquido o fundido.

Esta memoria consta de cuarenta páginas, escritas por una sola cara.

BARCELONA, 15 JUN 1956

P.A.

JOSÉ M. BOLIBAR
P. P.



1956

22937

FIG. 1

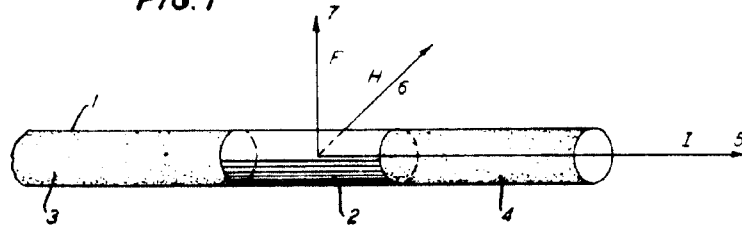
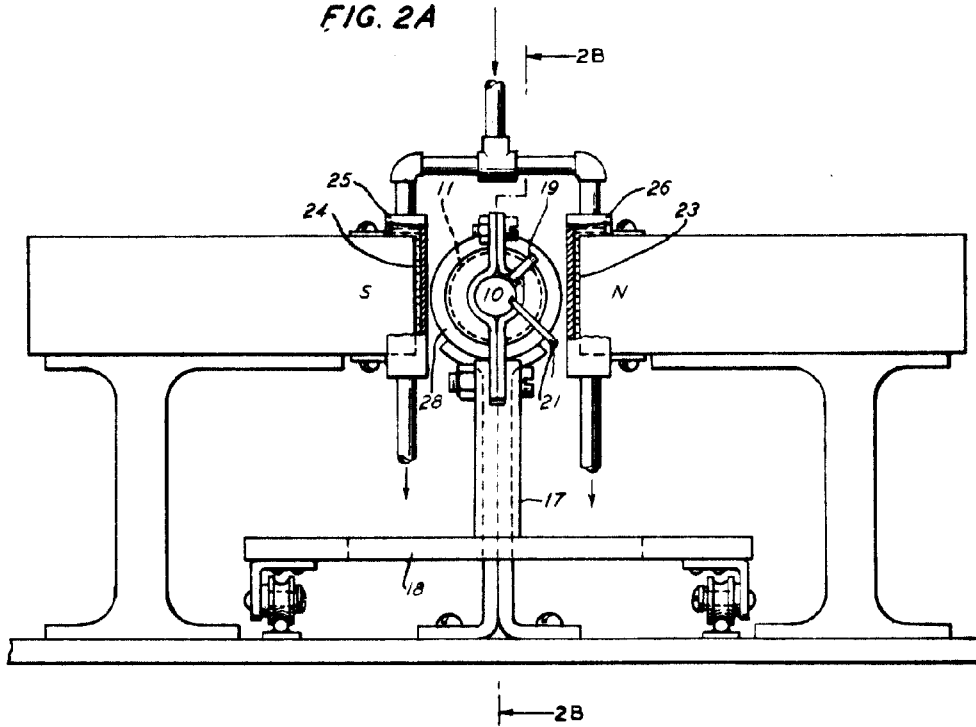


FIG. 2A



P.A.
JOSÉ M. B. ...
E. P.



JUN 1956

229377

FIG. 2B

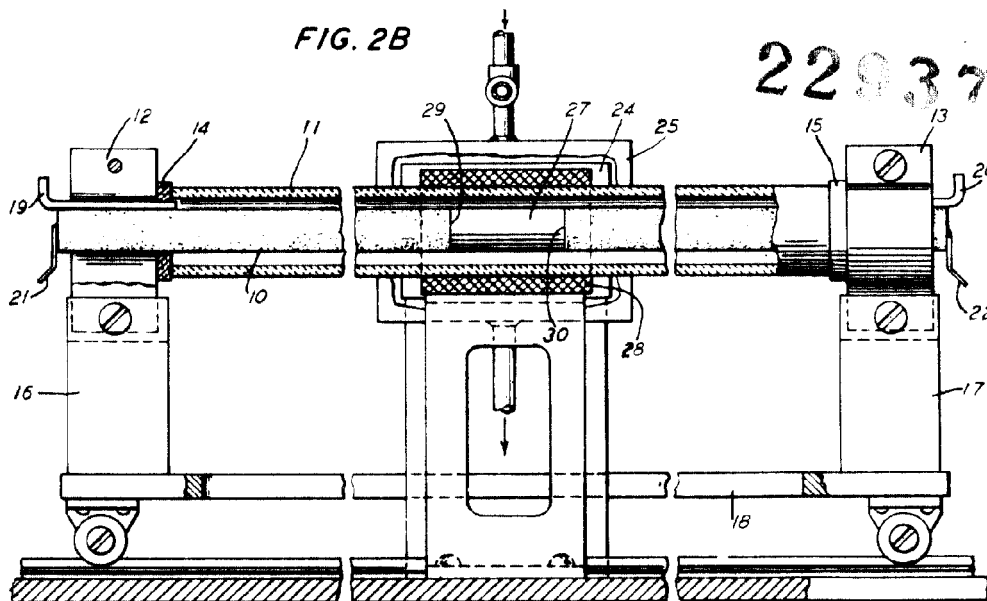


FIG. 3A

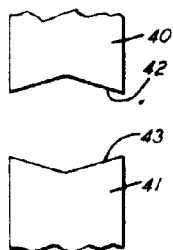


FIG. 3B

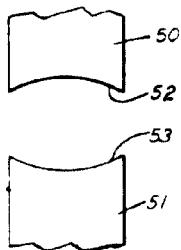


FIG. 3C

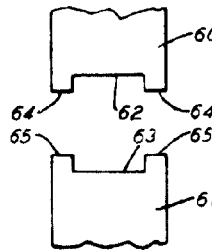


FIG. 4A

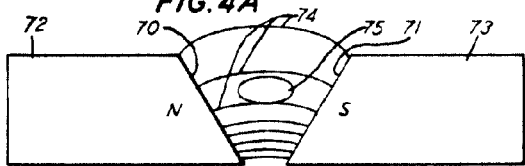


FIG. 4B

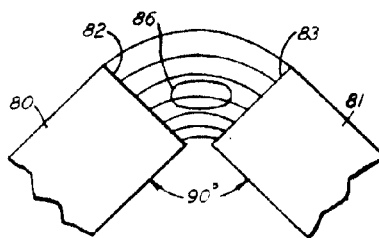
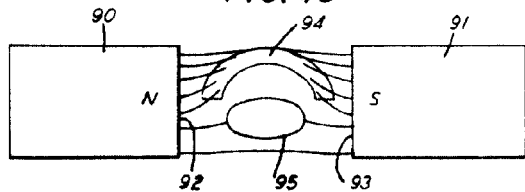


FIG. 4C



P.H.
[Handwritten scribbles]



JUN 1956

FIG. 5A

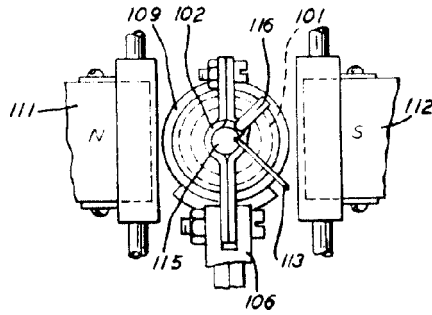
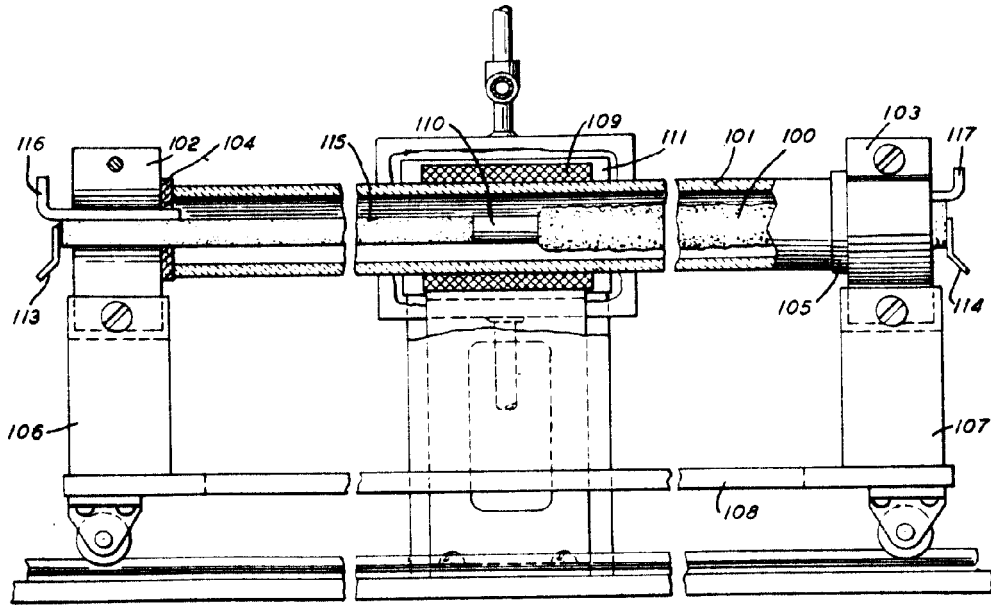


FIG. 5B

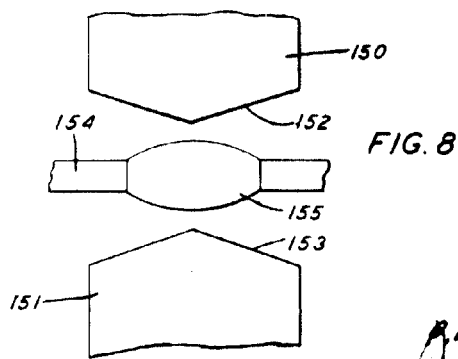
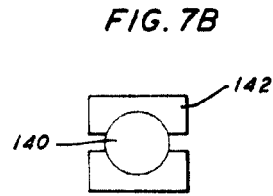
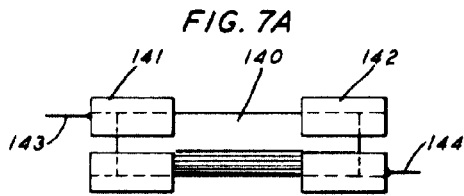
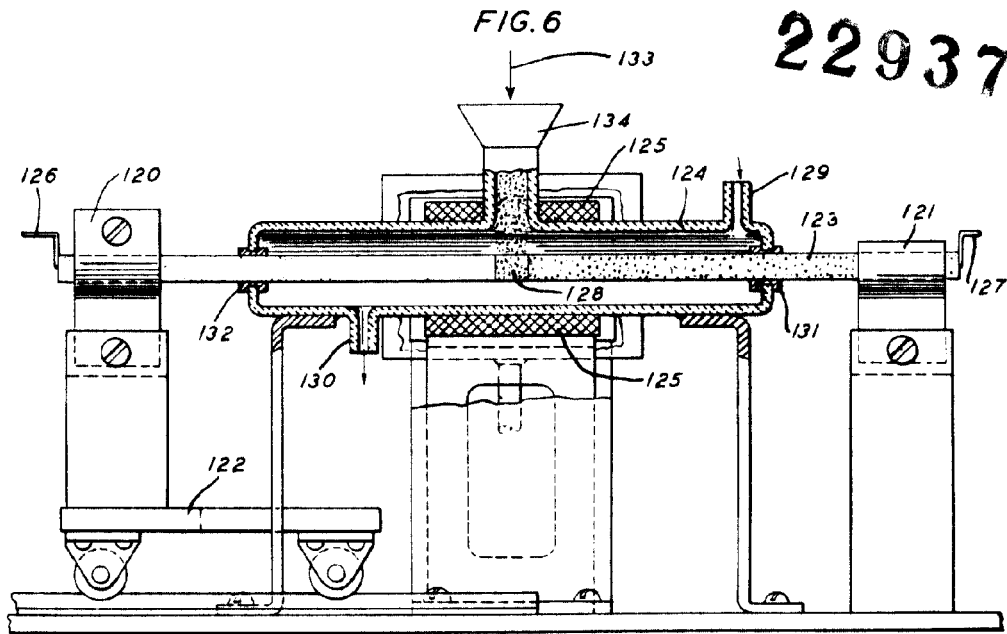


[Handwritten signature or scribble]



JUN 1956

229377



Handwritten scribbles and the number 24.