

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 574 083**

51 Int. Cl.:

F25B 21/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.08.2011 E 11178955 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.04.2016 EP 2541167**

54 Título: **Álabe de múltiples materiales para motores térmicos magneto-calóricos o electro-calóricos de regeneración activa**

30 Prioridad:

30.06.2011 GB 201111235

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

14.06.2016

73 Titular/es:

**CAMFRIDGE LTD (100.0%)
Lower Court 1 Copley Hill Business Park
Cambridge Road Babraham
Cambridge CB22 3GN, GB**

72 Inventor/es:

**ÖZCAN, SIBEL;
BURDETT, PAUL y
WILSON, NEIL**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 574 083 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

Álabe de múltiples materiales para motores térmicos magneto-calóricos o electro-calóricos de regeneración activa

5 Introducción

La presente invención se refiere a un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor térmico magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. En particular, el álabe de múltiples materiales actúa como un regenerador magnético activo (AMR) o un regenerador de electro-calórico activo (AER) en el motor respectivo, y está diseñado para mejorar significativamente su rendimiento. Tales motores térmicos pueden usarse en aplicaciones de refrigeración, bombeo de calor y recuperación de energía.

El motor de regeneración magnético activo y el regenerador magnético activo se identificaron primero por Barclay (véase, por ejemplo el documento US 4.332.135) en cuanto a que son capaces de explotar el efecto magneto-calórico de los materiales ferromagnéticos, con el fin de entregar la refrigeración y el enfriamiento a lo largo de un intervalo de temperatura relativamente amplio. Un dispositivo anteriormente denominado como el dispositivo magneto-calórico de Brown (véase el documento US 4.069.028) también utilizaba un ciclo de regeneración, aunque no un ciclo de regeneración magnética activa.

20 Materiales

Los materiales magneto-calóricos presentan el efecto magneto-calórico (MCE), que es el cambio en la temperatura tras la aplicación o eliminación de un campo magnético (típicamente medido en las condiciones adiabáticas). En condiciones isotérmicas, la aplicación o eliminación de un campo magnético impulsa un cambio en la entropía en el material de MCE. Los materiales electro-calóricos presentan el efecto electro-calórico (ECE), que es el cambio en la temperatura tras la aplicación o eliminación de un campo eléctrico (típicamente medido en condiciones adiabáticas). En condiciones isotérmicas, la aplicación o eliminación de un campo eléctrico impulsa un cambio en la entropía en el material de ECE.

La presencia del campo (ya sea eléctrico o magnético en función del material) fuerza una transición de un estado de entropía a otro. El tamaño del cambio de entropía depende de la magnitud del campo aplicado y el signo del cambio depende de la naturaleza de la transición. La temperatura característica a la que se produce la transición asociada con el cambio de entropía se conoce como la temperatura de Curie (T_c).

Los materiales que presentan estas propiedades incluyen, pero de ninguna manera se limitan a Gd (transición ferromagnética-paramagnética), RhFe (transición metamagnética anti-ferromagnética a ferromagnética), BaTiO₃ (transición ferroeléctrica a paraeléctrica), y, por ejemplo P (VDF-TrFE-clorofluoretileno) (mostrando un comportamiento ferroeléctrico relaxor).

Ciclo básico de refrigeración magnética

Un ciclo básico de refrigeración magnética (no regenerativa) se muestra en la figura 1A, para un material magneto-calórico que muestra un cambio de temperatura positivo cuando se expone a una transición de campo magnético (por ejemplo, paramagnético - ferromagnético).

Cuando se realizan las etapas 1 a 4, el material magneto-calórico sigue idealmente un ciclo, ABCD, mostrado en la figura 2. AB y CD son cambios de temperatura "adiabáticos" debidos a los campos magnéticos crecientes o decrecientes, respectivamente, y corresponden a las fases 1 y 3 de la figura 1a, respectivamente. BC y DA se alcanzan a través de un intercambio de calor entre el material magneto-calórico y un fluido de intercambio, y se corresponden con las fases 2 y 4 de la figura 1a, respectivamente. El fluido de intercambio puede absorber o rechazar calor con el mundo exterior a través de unos intercambiadores de calor. El cambio de temperatura adiabática del material magneto-calórico se etiqueta como ΔT (fría y caliente).

El lapso máximo (diferencia entre $T_{fría}$ y $T_{caliente}$) de este ciclo es el cambio de temperatura 'adiabática' ($\Delta T_{fría}$ o $\Delta T_{caliente}$) con una potencia de refrigeración baja. La potencia máxima de refrigeración es ΔS . La T_{media} en un lapso bajo (donde ΔS está dado por CA en la figura 2). Unos ciclos de refrigeración similares pueden generarse para materiales electro-calóricos.

Las propiedades útiles de un material magneto-calórico (o electro-calórico) pueden caracterizarse mapeando DS(T) y DT(T) para subir y bajar los campos magnéticos o eléctricos. De hecho, las curvas DS y DT son la diferencia (en o temperatura o entropía) frente a la temperatura entre las curvas de campo bajo y campo alto que se muestran en la figura 2. Son estas curvas DS y DT, y los diagramas T-S correspondientes los que se usan para diseñar los ciclos de refrigeración óptimos.

60 Ciclo de regeneración activa

El ciclo de regeneración magnética activa de Barclay, entregó una extensión significativa del lapso de temperatura a lo largo del ciclo magnético básico descrito anteriormente.

Cuando el refrigerante magnético se calienta por la aplicación de un campo magnético, un fluido de intercambio que fluye a través de una disposición de poros abiertos del material refrigerante mueve el "calor" a un extremo. Cuando el material refrigerante se enfría por la eliminación del campo magnético, el mismo fluido de intercambio se invierte y se mueve "frío" hasta el otro extremo. Cuando el fluido de intercambio se hace pasar cíclicamente entre los dos

extremos del AMR, y el campo magnético se aplica y se elimina con la misma periodicidad, se establece un gradiente de temperatura entre el lado de extremo frío y el lado extremo caliente del AMR. La idea conceptual se muestra en la figura 1b. El resultado es que a través del refrigerante pueden crearse unos gradientes de temperatura significativos de 30K (o más).

5 En cualquier punto en un AMR idealizado, el material refrigerante local, el campo aplicado y la temperatura local determinarán los TS locales reales (ABCD) de tipo bucle. Sin embargo, cada punto se acopla a través del fluido de intercambio, y así conjuntamente puede pensarse como someter todo el lecho a una cascada acoplada de fluido de intercambio.

10 Estado de la técnica

El diseño del AMR de Barclay consiste en unos materiales magneto-calóricos con una estructura de poros abierta, y el fluido de intercambio interpenetra el material magneto-calórico e intercambia calor con el material magneto-calórico. Una estructura de poros abierta simple es un lecho empaquetado de polvo, y un trabajo extenso se ha emprendido en tales regeneradores de lecho empaquetado (documentos US 4.332.135, US 6.526.759) y también en los regeneradores de lecho empaquetado sólido (documento US 2010/0107654 A1). Se han logrado impresionantes gradientes de temperatura entre el lado caliente y el lado frío.

15 Sin embargo, un lecho en polvo tiene varias desventajas. La principal desventaja es su baja velocidad de funcionamiento, normalmente solo de 0,1 Hz a 1 Hz. La velocidad de funcionamiento es la frecuencia con la que el fluido de intercambio y el campo magnético pueden realizar un ciclo. La baja frecuencia se traduce en una solución relativamente grande, pesada y cara por vatio de refrigeración. La limitación de frecuencia surge debido a que la alta presión cae a través del lecho empaquetado poroso del AMR, cuando se usa un fluido de intercambio líquido, a frecuencias más altas. Las caídas de presión dan como resultado grandes pérdidas de viscosidad y por lo tanto de bombeo. Aunque, utilizando un medio de intercambio gaseoso podrían reducirse las caídas de presión y las pérdidas de viscosidad, se limita la potencia de refrigeración disponible debido a la baja capacidad térmica de los gases.

20 Otra desventaja de los lechos en polvo es que la densidad de empaquetamiento más alta que puede alcanzarse es de un 74 % (en el empaquetamiento compacto hexagonal (HCP) también en el cúbico centrado en caras (FCC)), y en la práctica las densidades reales de empaquetamiento alcanzables son incluso más bajas. En el mejor caso, el 26 % del volumen de campo magnético no está ocupado por el material magneto-calórico. Maximizar la utilización del campo magnético es sin embargo crítico para lograr una solución comercial que cumpla con los requisitos de coste y tamaño y que utilice imanes compactos.

25 Además, el "cambio de temperatura adiabática" mencionado anteriormente AB es en realidad menor que la adiabática, debido a la presencia del fluido de intercambio en contacto directo con el material magneto-calórico, al que se transfiere el calor. Por lo tanto, el ciclo ABCD mostrado en la figura 2 es más como el ciclo AFCE también mostrado en la figura 2. En vez del cambio completo de temperatura ΔT , el cambio del material magneto-calórico es solamente $\Delta T - \delta T$. En consecuencia, ΔS (que se relaciona con la potencia de refrigeración) ya no es la diferencia de entropía entre D y A, sino más bien la diferencia más pequeña entre E y A. Con el fin de estar más cerca del ciclo ideal, la relación de capacidad térmica entre el fluido de intercambio y el material magneto-calórico necesita minimizarse. Esto puede lograrse, o aumentando la densidad de empaquetamiento del material magneto-calórico, reduciendo la cantidad relativa de fluido de intercambio, o reduciendo la capacidad térmica del fluido de intercambio relativo a la capacidad térmica del material magneto-calórico. Sin embargo, la última solución, aumenta las pérdidas de bombeo cuando necesita bombearse más fluido. Una alta densidad de empaquetamiento es preferentemente.

30 Las geometrías basadas en canal evitan las limitaciones de lecho empaquetado como la densidad de empaquetamiento del AMR que puede, en principio, ajustarse a cualquier valor entre 0 % (sin material magneto-calórico) a 100 % (sin canales). El aumento de la densidad de empaquetamiento del material permite la optimización de tanto el ciclo de refrigeración, es decir, para hacer AF tan cerca de AB (o CD tan cerca de CE) como se desee, como al mismo tiempo, maximizar la utilización del campo magnético, manteniendo al mismo tiempo los canales de tamaño finito y regulares (y por lo tanto la presión baja).

35 Al mismo tiempo, cae la presión inferior de los canales regulares y por lo tanto se pierde viscosidad.

40 Se han tratado un número de geometrías basadas en canal (Tishin, "The magnetocaloric effect and its applications", IOP Publicación 2003 y las referencias de la misma). Sin embargo, el reto para un dispositivo refrigerante comercial es lograr un alto gradiente de temperatura entre el extremo frío y el extremo caliente del AMR, mientras que se usan unos imanes de un tamaño razonable y unos AMR compactos.

45 Los materiales magneto-calóricos (y electro-calóricos) presentan la más alta ΔT y ΔS en la proximidad de sus temperaturas de Curie T_c aunque en función de la naturaleza de la transición el máximo puede ser agudo o plano y ancho. Para el diseño de un AMR óptimo (o de un AER) es imprescindible tener unos materiales con una alta ΔT y ΔS a lo largo de toda la longitud del AMR (o del AER). Por lo tanto, se usarán unos materiales múltiples con ΔT y ΔS optimizados en función del intervalo de temperatura en el que funcionarán. La elección de los materiales magneto-calóricos adecuados y un modelo detallado de la estructura del AMR (o del AER) son muy importantes para lograr unos diseños eficientes.

50 Al mismo tiempo la potencia de refrigeración total de un AMR (o del AER) depende del número de ciclos por segundo (ABCD o AFCE) que puede someterse el AMR (o el AER), con un intercambio simultáneo de calor con el fluido de intercambio y los intercambiadores de calor y frío. Las frecuencias de funcionamiento altas, es decir, el movimiento rápido alrededor del ciclo descrito anteriormente ABCD (o AFCE), es por lo tanto esencial para soluciones pequeñas y compactas.

65

La potencia de refrigeración real depende de las pérdidas, y es una medida, de cuánta capacidad de refrigeración del refrigerante puede liberarse a partir del material magneto-calórico del AMR (o del AER) en el fluido de intercambio, y por consiguiente puede realizarse en el extremo frío del AMR (o del AER), mediante un paso de caliente a frío, en el intercambiador de frío (o fuera del extremo caliente del AMR (o del AER), mediante un paso de

5 frío a caliente, en el intercambiador de calor para aplicaciones de bombeo de calor).
Idealmente, la potencia de refrigeración y la capacidad de refrigeración deben ser la misma. La diferencia, sin embargo, entre la potencia de refrigeración y la capacidad de refrigeración se denomina como la "pérdida total", que se compone de un número de diferentes factores contribuyentes. La pérdida asociada con el transporte de calor en el fluido de intercambio se denomina en el presente documento como "pérdida de HE"; esta pérdida se asocia con los gradientes de temperatura dentro del fluido de intercambio. La pérdida asociada con el reflujo de calor a través del AMR de caliente a frío se llama "pérdida de reflujo". La pérdida asociada con el flujo de calor local dentro del material refrigerante se denomina "pérdida local". La pérdida asociada con la histéresis se llama "pérdida de histéresis". La pérdida asociada con el bombeo del fluido se llama "pérdida de viscosidad", y se asocia con la disipación viscosa en el fluido. El diseño de un AMR óptimo requiere la minimización de todas las pérdidas.

15 En un motor térmico magnético un gran componente físico es el imán. Maximizar la utilización del campo magnético (por ejemplo a través de una alta densidad de empaquetamiento) por unidad de volumen de refrigerante es por lo tanto un imperativo para una solución compacta.

En general, el problema objetivo de la presente invención es superar las desventajas mencionadas anteriormente del estado de la técnica, y proporcionar un AMR (o un AER) que mejore el rendimiento de un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. El objetivo final es hacer el motor respectivo comercialmente viable.

20 En particular, la presente invención trata de:

1. especificar los criterios de selección de materiales para los dispositivos AMR o AER de múltiples materiales de alto rendimiento.

2. especificar las arquitecturas óptimas para los regeneradores basados en canal óptimos

3. especificar las geometrías óptimas para los regeneradores basados en canal para minimizar las pérdidas (pérdida de HE, pérdida local, pérdida de reflujo, pérdida de viscosidad), maximizar el rendimiento y maximizar la utilización del campo aplicado.

4. especificar las mejoras de las arquitecturas y las geometrías para minimizar las pérdidas y ayudar en la fabricación.

5. especificar los métodos para la fabricación de arquitecturas y mejoras óptimas.

El AMR o el AER debería ser más fácil de montar, tener suficiente resistencia mecánica, una estructura fiable, y debería comprender unos materiales que sean fáciles de procesar.

La presente invención pretende también reducir el tamaño y el coste del AMR (o del AER) y del motor de regeneración activa, y pretende fabricar el AMR (o el AER) con los procesos de fabricación de alta velocidad y de bajo error automatizados.

El documento WO 03/016794 A1 se refiere a un sistema de manejo de fluidos que comprende un dispositivo para cambiar la temperatura del fluido que fluye a través del sistema. El dispositivo se basa en el efecto magneto-calórico de los materiales magnéticos para efectuar los cambios de temperatura.

El documento US 2011/048031 A1 se refiere a los regeneradores en la refrigeración magneto-calórica. En particular, se presenta un regenerador, que tiene una matriz de difusividad térmica que incluye un material magneto-calórico que tiene múltiples salientes en miniatura íntimamente empaquetados para formar un hueco entre los salientes. Se proporciona una trayectoria de fluido dentro del hueco.

El documento WO 2008/142253 A1 describe un dispositivo de transferencia de calor con al menos un elemento que tiene unas propiedades magneto-térmicas, que se incorpora en un circuito capaz de conducir un flujo magnético, y en contacto térmico con un fluido frío, un fluido aislante térmicamente y un fluido caliente, respectivamente. El dispositivo incluye también unos medios para generar un campo magnético permanente y unos medios para generar un campo magnético variable y para aplicar este campo magnético a cada elemento que tiene las propiedades magneto-térmicas.

El documento JP 2010 025435 A se refiere a un dispositivo de refrigeración magnética con un recipiente de intercambio de calor lleno de partículas de material magnético que tienen unos efectos magneto-calóricos. Se proporciona un mecanismo de aplicación y eliminación de campo magnético capaz de aplicar y de eliminar el campo magnético con respecto a las partículas de material magnético. Se hace fluir un refrigerante líquido desde un lado extremo al otro lado extremo dentro del recipiente de intercambio de calor, sincronizando con la aplicación y la eliminación del campo magnético. Además, se proporciona un mecanismo de generación de turbulencias para hacer que el refrigerante líquido fluya dentro del recipiente de intercambio de calor en un estado de turbulencia.

Sumario de la invención

Por lo tanto, la presente invención se refiere a un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa para su uso en aplicaciones de refrigeración, bombeo de calor y recuperación de energía, siendo el álabe una pila de una pluralidad de elementos.

El álabe comprende un cuerpo de álabe hecho de una pluralidad de elementos fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos, en el que el cuerpo de álabe se divide a lo largo de su longitud en dicha pluralidad de elementos. El álabe comprende además una pluralidad de canales asociados, que penetran en el cuerpo de álabe y que se extienden a lo largo de la longitud del álabe. Cada uno de la pluralidad de canales asociados del álabe está provisto de una capa de recubrimiento hidrófoba, y se proporciona una capa de vidrio o de plástico por debajo de la capa de recubrimiento hidrófoba.

SELECCIÓN DE MATERIALES

Preferentemente, cada uno de la pluralidad de elementos está hecho de un material magneto-calórico preferentemente seleccionado del grupo de LaFeSi, LaFeSiCo, LaFeSiH, MnPFeAs, MnPFeSi, Ferh, MnAsSb, MnPFeGe, Gd, GdDy, CoMnSi, CoMnGe, y GdSiGe, que adicionalmente puede estar provisto de uno o más agentes de dopado (que a menudo desplaza el Tc o hacia arriba o hacia abajo para una familia de materiales), y pueden tener relaciones variables de los elementos especificados, en el que cada material magneto-calórico tiene una temperatura de Curie diferente, y cada material magneto-calórico tiene una porosidad del 20 % o menos en relación con su volumen.

Los materiales electro-calóricos adecuados incluyen P(VDF-TrFE-clorofluoretileno), PLZT (8/65/35), Pb(Mg1/2Nb2/3)O3-35PbTiO3 (PMN-35PT)), BaTiO3, o (NH4) 2SO4.

En un sistema ideal (despreciando las pérdidas), a una temperatura media del lado frío $T_{fría}$ la energía de refrigeración cíclica disponible de un refrigerante está dada por $T_{fría} \cdot \Delta S'_{fría}$ para un campo aplicado dado B (donde $\Delta S'_{fría}$ está dada por la diferencia absoluta de entropía entre los puntos D y A en la figura 2 (o en la práctica D' y A).

En un ciclo de refrigeración regenerativa, que abarca desde una $T_{fría}$ media a una temperatura media del lado caliente $T_{caliente}$, la parte de longitud del regenerador que contribuye a la refrigeración es $0,5 \cdot \Delta T_{fría}$ Longitud/Lapso, en el que el lapso se define como el gradiente de temperatura $T_{caliente} - T_{fría}$ (entre el extremo caliente y el extremo frío del AMR o del AER), y la longitud es la longitud del AMR (o del AER). Esto puede demostrarse simplemente para un sistema ideal por un experto en la materia usando un argumento geométrico simple, suponiendo que el fluido de intercambio que entra en el regenerador tiene un perfil de temperatura apropiado. La capacidad de refrigeración del regenerador (cíclico) total en (J) de un AMR (o del AER) multi-capa es igual a $0,5 \cdot \Delta T_{fría} \cdot \Delta S'_{fría} \cdot T_{fría} \cdot \text{Longitud} \cdot \text{Área} \cdot \text{Densidad} \cdot \text{Densidad de empaquetado}$ / Lapso en una configuración multi-capa "ideal", en la que la longitud es la longitud del regenerador, el área es el área de la sección transversal del regenerador, la densidad es la densidad del material y la densidad de empaquetado es el % de volumen de refrigerante activo, es decir, el material magneto-calórico o electro-calórico.

Esta exposición no se limita a aplicaciones de refrigeración, y puede aplicarse a los motores térmicos que se usan para aplicaciones de bombeo de calor y de recuperación de energía.

Extrayendo las propiedades del material (y despreciando la densidad) de la ecuación anterior se obtiene un factor de calidad de un material magneto-calórico (o electro-calórico), que es simplemente $\Delta T \Delta S$. En un dispositivo práctico el tamaño del campo aplicado es relevante, especialmente desde el punto de vista económico, y un refinamiento adicional sería normalizar este valor en función del campo aplicado. Por simplicidad, tomando los valores pico de tanto ΔS como ΔT para un material, puede usarse el factor de calidad para comparar diferentes materiales. Algunos de los desarrollos clave de los materiales magneto-calóricos se resumen en la siguiente tabla.

Material	Ejemplo de material	ΔS (1T) (J/Kg K)	ΔT (1T) (K)	Factor de calidad (J/kg)
1ª Generación	Gd	~ 2,5	~ 3	~ 7,5
2ª Generación	Tipo LaFe ₁₃ SiCo	~ 5,5	~ 2,2	~ 12,1
3ª Generación	Tipo LaFe ₁₃ SiH	~ 10	~ 3,5	~ 35

En general, un factor más alto de calidad es preferible a uno más bajo, aunque las consideraciones tales como la histéresis, o la velocidad o la longevidad del efecto magneto-calórico (o electro-calórico), pueden dar lugar a seleccionar unos materiales con un factor de calidad inferior.

La diferencia de entropía máxima ΔS y la ΔT máxima se produce en (o en la proximidad de) la temperatura de Curie. Cuando múltiples materiales con aumento o disminución de las temperaturas Curie están en cascada de la manera correcta, pueden trazar la temperatura definida por el gradiente de temperatura entre el extremo caliente y frío del álabe. Cuando se usan tales materiales adecuados en diversos puntos de temperatura a lo largo de la longitud del álabe, el gradiente de temperatura total, cuando se aplica cíclicamente un campo magnético (o eléctrico) y un fluido intercambiado se bombea cíclicamente a través del álabe, puede aumentarse de manera significativa. Además, no es suficiente considerar solo la temperatura de Curie. La capacidad de refrigeración de regenerador de la pluralidad

de elementos necesita maximizarse a lo largo de la longitud del regenerador. Además la pluralidad de elementos debe tener una capacidad de refrigeración de regenerador lentamente ascendente, la velocidad de aumento proporcional al lapso del AMR (o del AER) y proporcional al trabajo de entrada necesario para impulsar el ciclo de refrigeración.

5 Expresando la ecuación de regenerador anterior en términos de parámetros locales, la capacidad de refrigeración en un punto (x) en un elemento dado, se define como $\Delta S(T(x)) \cdot \Delta T(T(x)) \cdot T(x) \cdot \text{Longitud} \cdot \text{Área} \cdot \text{Densidad} \cdot \text{Densidad de empaquetado/Lapso}$, para ese elemento, en la que $T(x)$, $\Delta S(T(x))$ y $\Delta T(T(x))$ y $T(x)$ es la temperatura local, la entropía y el cambio de temperatura 'adiabática' del material local, la longitud es la longitud del elemento, el área es el área de sección transversal del elemento, la densidad es la densidad del material local, y la densidad de empaquetamiento es la densidad de empaquetamiento del elemento local (% en volumen de refrigerante activo al volumen total) y el lapso es el lapso a través del elemento. La suma de los lapsos a través de cada elemento es el lapso total a través del regenerador. Téngase en cuenta que para los cálculos de capacidad de refrigeración, los valores absolutos ΔS y ΔT se usan en todas las circunstancias. Esto se entiende que es el caso en todo el presente documento.

10 Téngase en cuenta que en la práctica, a menudo el área, la densidad y la densidad de empaquetamiento son iguales o similares a través de múltiples elementos; sin embargo la longitud puede ser considerablemente diferente entre los elementos, y por lo tanto es un parámetro útil que puede usarse para el ajuste fino de la capacidad de refrigeración de los elementos.

15 Téngase en cuenta que la multiplicación de la capacidad de refrigeración de regenerador por la frecuencia, da la potencia de refrigeración de potencial máximo del regenerador.

20 En el límite entre los elementos, y en el que el elemento adyacente está hecho de un material diferente con una temperatura de Curie diferente, y que posee por lo tanto diferentes propiedades de ΔS y ΔT , se requiere idealmente una transición suave entre las capacidades de refrigeración. Esto puede lograrse ajustando la longitud de los elementos individuales o eligiendo el material apropiado o la temperatura de Curie.

25 Sin embargo, el cambio entre los elementos con diferente T_c es discontinuo, y solo puede lograrse una capacidad de refrigeración casi continua, de tal manera que la variación no es más del 30 % de manera inmediata entre los elementos vecinos (tanto para un cambio de campo hacia arriba como hacia abajo). Eso significa que la capacidad de refrigeración en un límite entre dos elementos a lo largo del cuerpo de álabe resulta dentro del 30 %. Un cambio en la capacidad de refrigeración de un elemento a otro en un límite de elemento está por lo tanto por debajo del 30 %. El mínimo en la capacidad de refrigeración dentro de un elemento se localiza en cualquiera de los dos extremos del elemento. Cambiando bruscamente las curvas de ΔS y ΔT (tales como las encontradas en los materiales de tipo de primer orden) necesitarán el uso de muchos materiales diferentes, y se requerirá unas escalas de longitud más corta para cada elemento para garantizar la capacidad de refrigeración casi continua.

30 Los gradientes de temperatura a través de cada uno de la pluralidad de elementos deben ser tan igualados como sea posible. De no hacerlo, se crean unos gradientes de temperatura locales en los elementos que aumentarán las pérdidas del regenerador. Adicionalmente, los gradientes de temperatura locales (o tras una elevación de campo o una caída de campo) pueden producirse en la interfaz entre dos materiales con diferente T_c y por lo tanto las curvas de ΔT . Esto puede provocar un reflujo mejorado localmente, o un flujo de avance localmente de calor en función del gradiente de temperatura que prevalece. Para evitar tales gradientes de temperatura locales, que generan una entropía que interrumpe el funcionamiento de cualquier motor magneto-calórico de regeneración activa, las curvas de ΔT deberían coincidir tan estrechamente como sea posible en la interfaz. Sin embargo, las curvas ΔT para un campo hacia arriba y hacia abajo a una temperatura dada pueden ser muy diferentes y por lo tanto tal coincidencia, aunque deseable, no es completamente posible. Por lo tanto, pueden usarse los separadores de baja conductividad térmica entre los diferentes materiales. Estos separadores tienen poco impacto en la relación de la pérdida de reflujo general con la potencia de refrigeración (a medida que la potencia de refrigeración cae linealmente con la longitud de espaciador total, así lo hace el reflujo), pero reducen la 'pérdida local' de generación de entropía.

35 La presente invención se refiere a los criterios de selección de materiales para la pluralidad de elementos en el álabe de múltiples materiales, de tal manera que se utilizan materiales con altos factores de calidad (mayor que el gadolinio), y la capacidad de refrigeración se maximiza a lo largo de la longitud del AMR (o del AER). Además, la capacidad de refrigeración debería ser cuasi-constante (dentro del 30 %, y preferentemente inferior) inmediatamente entre los elementos vecinos, elevándose a lo largo de la longitud del regenerador a una velocidad proporcional al lapso y al trabajo de entrada del regenerador, con la capacidad de refrigeración más baja en cualquier elemento localizado en uno de los dos extremos.

40 Además, en orden de prioridad, las temperaturas Curie (T_c) a lo largo de la longitud del AMR (o del AER) de frío a calor debería aumentar, la capacidad de refrigeración debería coincidir en las interfaces del material (para tanto los cambios de campo hacia arriba como hacia abajo) (por la selección correcta de la T_c del material, la densidad de empaquetamiento, la densidad y la longitud del elemento), y debería minimizarse la diferencia entre las curvas de ΔT en las interfaces del material (para tanto el cambio de campo hacia arriba como hacia abajo). Los criterios de selección de material mencionados anteriormente se aplican a todas las arquitecturas de canal (descritas en más detalle a continuación), que incluyen, pero no se limitan a, unas placas paralelas (figura 4), unas pilas de placas paralelas, unas pilas de placas paralelas con 90° de rotación (figura 3), unas placas perforadas (figura 9), unas pilas de placas perforadas (figura 8) y unas variaciones mejoradas y evolventes (figura 16) (descritas en el presente documento) de las mismas.

Además, la presente invención usa espaciadores, presentes en este caso para minimizar las pérdidas locales entre los elementos de diferentes materiales, y reducir las pérdidas locales en el diseño del AMR (o del AER), dimensionado para minimizar el reflujo local. Los gradientes de temperatura locales, en lugar de las consideraciones de gradientes de temperatura globales (lapso / longitud), se usan para dimensionarlos (con el espesor preferido en el intervalo de 50 μm a 1000 μm). Tales espaciadores deberían realizarse de un material de baja conductividad térmica (preferentemente de 0,01 a 2 W/mK) y permitir el flujo del fluido de intercambio entre los elementos vecinos o a través de una estructura de poros abierta o conformada con el fin de no bloquear los canales completamente. La disposición anterior de los materiales magneto-calóricos es válida para todas las arquitecturas basadas en canales de acuerdo con la presente invención. Preferentemente, cada uno de la pluralidad de elementos tiene una conductividad térmica en un intervalo de 0,1 W/mK a 30 W/mk, preferentemente de 0,1 W/mK a 10 W/mK, más preferentemente de 0,1 W/mK a 5 W/mK o más preferentemente de 0,1 W/mK a 2 W/mK. Una baja conductividad térmica de la pluralidad de elementos minimiza la así llamada pérdida de reflujo en el AMR (o en el AER). La pérdida de reflujo es el calor que fluye de manera natural desde el extremo caliente del álabe al extremo frío del álabe, cuando se utiliza en un motor magneto-calórico o electro-calórico. Para lograr la baja conductividad térmica, tienen que usarse unos materiales adecuados. Además, cuando, por ejemplo, cada uno de la pluralidad de elementos se realiza de polvos unidos extruidos de diferentes materiales magneto-calóricos, se usa preferentemente un agente aglutinante de baja conductividad térmica. El agente aglutinante es preferentemente para tener una conductividad térmica que sea menor o como máximo igual a la conductividad térmica de los materiales magneto-calóricos.

Los materiales anteriormente indicados (y sus variantes) pueden seleccionarse para presentar un gran efecto magneto-calórico (o electro-calórico) y un alto factor de calidad, tienen una baja conductividad térmica, y pueden fabricarse en las escalas de longitud adecuadas. Los materiales tienen unas temperaturas de Curie T_c en el intervalo de temperatura deseado. Los materiales son adecuados para proporcionar unos elementos con diferentes temperaturas de Curie a lo largo de la longitud del álabe, con el fin de aumentar el gradiente de temperatura total que se establece en el ciclo de regeneración. Además la capacidad de refrigeración de estos materiales puede hacerse coincidir para proporcionar una solución óptima.

ARQUITECTURAS Y GEOMETRÍAS

Las arquitecturas con canales asociados a través del cuerpo de álabe ayudan a evitar las pérdidas de alta presión que se producen en los AMR de lecho empaquetado. El objetivo de un diseño de AMR (o de AER) avanzado es proporcionar la máxima refrigeración, mientras que las pérdidas se minimizan. La selección de los materiales de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente maximiza el potencial de refrigeración de un AMR (o de un AER). Sin embargo, el minimizar las pérdidas requiere un examen más detenido.

Las pérdidas en un sistema de AMR (o de AER) aumentan la cantidad de trabajo de entrada necesario para lograr una cantidad de refrigeración, disminuyendo de este modo la eficacia del dispositivo de AMR. Se requiere un dimensionamiento correcto de la arquitectura del AMR (o del AER) con el fin de minimizar las pérdidas. Como ya se ha indicado, algunas de las pérdidas principales asociadas con un AMR (o un AER) son la pérdida de HE, la pérdida de reflujo, la pérdida de viscosidad, la pérdida local y la pérdida de histéresis. La pérdida de reflujo puede minimizarse usando un refrigerante de baja conductividad térmica, los espaciadores pueden usarse en un álabe de múltiples materiales para minimizar las pérdidas locales, y el uso de unos materiales de baja histéresis minimiza la pérdida de histéresis. Las arquitecturas de canal reducen en general la pérdida de viscosidad. Sin embargo, la pérdida dominante en un sistema de AMR (o de AER) es la pérdida de HE, asociada con los gradientes de temperatura en el fluido, mientras que se transfiere calor desde el refrigerante al fluido de intercambio y por lo tanto a los intercambiadores de calor.

Por ejemplo, después de un cambio negativo de temperatura adiabática, el fluido caliente encuentra el refrigerante frío y se produce un rápido intercambio de calor (paso CD' en la figura 2). A continuación, el fluido se hace pasar de caliente a frío, y el fluido más caliente se empuja hacia el material más frío, transfiriendo calor desde el fluido al material, calentando de este modo los materiales refrigerantes (etapa D'A en la figura 2). La velocidad de transferencia de calor determina el tiempo que se tarda (o deseado) para completar el intercambio de calor de refrigerante (esto normalmente limita la frecuencia de funcionamiento máxima del sistema). El fluido próximo a la pared está en equilibrio térmico con el refrigerante; sin embargo, el fluido en el centro del canal está más caliente. Por lo tanto, aparte de en el comienzo de un paso a frío, la temperatura media del fluido que sale del extremo frío del AMR es más caliente que el extremo frío del AMR. El gradiente de temperatura dentro del canal de fluido determina cuanta de la capacidad de refrigeración del refrigerante está realmente disponible en el intercambiador de frío, cuando la presencia del fluido más caliente diluirá la capacidad de refrigeración total del fluido de intercambio. Esta reducción de la capacidad de refrigeración se llama pérdida de HE. Efectos análogos se producen en un paso a caliente.

Fijando la caída de presión (o la pérdida de viscosidad) a través de un canal de cierta longitud dentro de un AMR con un lapso medio constante fijo, la velocidad de transferencia de calor desde el refrigerante al líquido (o viceversa) se escala con un diámetro de canal (es decir, cuando el diámetro del canal disminuye, la transferencia de calor disminuye). La pérdida de HE disminuye también a medida que disminuye el diámetro del canal, pero lo hace de manera más rápida (a una potencia más alta de la escala) que la velocidad de transferencia de calor. Al reducir el diámetro del canal, la pérdida de HE puede escalarse a una cantidad pequeña arbitraria. Sin embargo, la velocidad de transferencia de calor está disminuyendo también, limitando de este modo el límite superior de la frecuencia de funcionamiento. La velocidad de transferencia de calor es la cantidad de calor por segundo que se está transfiriendo

desde el fluido al refrigerante (o viceversa). Para compensar la reducción de velocidad de transferencia de calor, la cantidad de calor a moverse puede reducirse reduciendo la cantidad de refrigerante (por ejemplo, usando unas placas más delgadas). Sin embargo, al reducir la cantidad de refrigerante se reduce la relación de empaquetado del líquido con el refrigerante en el AMR (o en el AER), resultando en que CE diverge de CD, y reduciendo la densidad de empaquetado total. Al mismo tiempo, las escalas pequeñas de longitud de refrigerante son más difíciles de fabricar. Por lo tanto, un AMR debería dimensionarse de tal manera que las sumas de la pérdida de viscosidad (determinada por la longitud de AMR, las propiedades físicas del fluido de intercambio y la velocidad de flujo, así como el diámetro de canal), la pérdida de reflujo (determinada por la longitud, el lapso, la conductividad térmica del refrigerante y del líquido, el volumen del líquido y del refrigerante), y la pérdida de HE (determinada por la anchura de canal, las propiedades del fluido de intercambio, la velocidad de flujo, ΔS y ΔT del refrigerante, el volumen del líquido y del refrigerante, y la longitud y el lapso del AMR) se minimiza, para una frecuencia de funcionamiento de destino (en el intervalo de 1 Hz - 20 Hz). Una solución preferida tiene las tres pérdidas que son de un tamaño comparable (dentro de un factor de 10 la una de la otra). Para un canal de placas paralelas dentro de un elemento (incluyendo la envolvente) el espesor de placa óptimo debería estar en el intervalo de 50 μm a 1500 μm , o más preferentemente de 70 μm a 700 μm , o más preferentemente de 90 μm a 400 μm . La separación entre canales debería estar en el intervalo de 5 μm a 100 μm , o más preferentemente de 10 μm a 75 μm , o incluso más preferentemente, de 15 μm a 60 μm .

Para una placa perforada, la distancia óptima entre las perforaciones debería estar en el intervalo de 60 μm a 2000 μm , o más preferentemente de 80 μm a 1.000 μm , o más preferentemente de 100 μm a 650 μm . El diámetro de la perforación debería estar en el intervalo de 10 μm a 150 μm , o más preferentemente de 15 μm a 110 μm , o incluso más preferentemente de 20 μm a 85 μm .

Los valores dados logran un balance entre la pérdida de viscosidad, el reflujo y la pérdida de HE.

Las escalas de longitud dadas son en cierto modo dependientes de los materiales magneto-calóricos que se usan.

En el primer ejemplo de un álabe de múltiples materiales, cada uno de la pluralidad de elementos está formado por una pluralidad de placas, la pluralidad de placas están apiladas una encima de la otra. Además, cada uno de la pluralidad de elementos en el cuerpo de álabe se hace girar con respecto a sus elementos adyacentes, preferentemente se gira 90°. Esta disposición soporta la mezcla del fluido de intercambio, es decir, aumenta la homogeneidad térmica a través de los canales asociados y reduce la pérdida de HE cuando se usa en un motor magneto-calórico de regeneración activa. Además, esta disposición mejora la fiabilidad de la fabricación de montaje completa, ya que no se requiere un canal paralelo continuo a lo largo de la longitud del álabe. La longitud sobre la que se requiere el montaje paralelo exacto se reduce a la longitud de un único elemento en vez de al álabe completo. Preferentemente, las placas están separadas una de otra por al menos un espaciador, preferentemente impreso con técnicas bien conocidas de impresión de inyección de tinta, de impresión de plantilla o de pantalla, fotolitografía, o de aplicación directa por un sistema de punteo o de chorro, en las que las separaciones entre la pluralidad de placas forman la pluralidad de canales asociados.

Usando dichas tecnologías bien conocidas, y reduciendo en consecuencia los costes de fabricación, se convierte en factible una solución comercial. La fabricación se hace también más sencilla, más rápida y más reproducible. Tales equipos comerciales listos para su uso (COTS) pueden usarse en el proceso de fabricación, y pueden automatizarse muchas etapas de fabricación.

La presente invención se refiere además a un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico de regeneración activa. El álabe comprende un cuerpo de álabe hecho de una pluralidad de elementos fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos, en el que el cuerpo de álabe se divide a lo largo de su longitud en dicha pluralidad de elementos. El álabe comprende además una pluralidad de canales asociados, que penetran en el cuerpo de álabe y se extienden a lo largo de la longitud del álabe. Cada uno de la pluralidad de elementos del álabe tiene una forma curvada, de tal manera que la pluralidad de elementos puede formar un cuerpo de álabe envolvente. En un dispositivo refrigerante, un álabe de acuerdo con la presente invención puede suministrar una cantidad de unidad de potencia de refrigeración. Combinando múltiples álabes, la potencia de refrigeración puede incrementarse sin reducir la eficiencia del dispositivo. Una combinación de álabes puede realizarse, por ejemplo, como un sistema magnético rotativo, en el que los álabes están dispuestos en un círculo y se hacen girar a través de un campo magnético. Como se ha explicado anteriormente, la utilización del campo magnético es importante. Cuando los álabes en forma de cuboides se empaquetan juntos en un círculo, la densidad de empaquetamiento y, correspondientemente, la utilización del campo magnético no serán ideales. Un diseño envolvente del cuerpo de álabe, o de los elementos que componen un cuerpo de álabe ofrece, sin embargo, la posibilidad de empaquetar múltiples álabes juntos en una geometría radial perfecta con una anchura de canal constante en un sistema magnético rotativo. Esto significa que pueden montarse múltiples láminas en un círculo completo, en el que puede mantenerse una separación constante entre los diferentes álabes, y las placas dentro de los elementos del álabe. Esta disposición resulta en una mejor utilización de campo en un 30 %.

Correspondientemente, pueden usarse imanes más pequeños y menos costosos.

Debido a los canales asociados a través de los que puede fluir el fluido, pueden usarse unos materiales magneto-calóricos con menor porosidad. La porosidad de un material se provoca en general por los poros distribuidos y es una propiedad del material. La porosidad puede entenderse como el volumen de huecos (poros) en el material magneto-calórico con respecto a su volumen total. En contraste con esto, los canales asociados que pueden crearse de manera activa en los materiales magneto-calóricos no se consideran que sean porosos.

La presente invención se refiere además a un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. El álabe comprende un cuerpo de álabe hecho de una pluralidad de elementos fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos, en los que el cuerpo de álabe se divide a lo largo de su longitud en dicha pluralidad de elementos. El álabe comprende además una pluralidad de canales asociados, que penetran en el cuerpo de álabe y se extienden a lo largo de la longitud del álabe. La sección transversal del cuerpo de álabe perpendicular a los canales asociados tiene a lo largo de una dirección predeterminada una pluralidad de regiones de diferente porosidad, en el que en una interfaz de las regiones adyacentes la porosidad cambia bruscamente al menos un 10 %.

Las regiones de mayor porosidad pueden, por ejemplo, actuar como la pluralidad de canales asociados si es una estructura de poros abierta (y en estos también pueden actuar unos espaciadores), en el que las regiones de menor porosidad se hacen de materiales magneto-calóricos más densos. Sin embargo, pueden proporcionarse además unos canales asociados al material de mayor porosidad. Las regiones más altas de porosidad también pueden funcionar como una estructura de mezcla para un fluido de intercambio. La función de mezcla de las regiones porosas reduce la pérdida de HE, cuando el álabe se usa en un motor magneto-calórico de regeneración activa. Las regiones de mayor porosidad pueden formarse como estructuras similares a esponjas flexibles, que pueden adaptarse y cambiar su forma. De esta manera pueden compensar cualquier irregularidad provocada en la fabricación de los elementos. Las regiones de mayor porosidad y de menor porosidad pueden disponerse asimismo para cada uno de la pluralidad de elementos, o pueden disponerse de manera diferente para cada elemento.

Varios métodos conocidos podrían emplearse para medir la porosidad en un material, por ejemplo, unos métodos ópticos (es decir, determinando la superficie del material frente a la superficie de los poros visible bajo el microscopio), unos métodos de humectación (es decir, la inmersión de una muestra porosa al vacío en un fluido que preferentemente moja los poros), un método de saturación de agua (es decir, el volumen de poros es igual al volumen total de agua que queda después del remojo) o un método de evaporación de agua (es decir, el volumen de poros es igual al peso de una muestra saturada menos el peso de una muestra seca considerando la densidad del agua).

Cualquier poro en el material magneto-calórico no pasará a través de todo el cuerpo de álabe como los canales asociados, que son por lo general más bien cortos. Los poros naturales son normalmente del orden de 0,01 mm a 10 mm de largo, y son más bien pequeños en diámetro, es decir, en el orden de 0,01 mm a 50 mm. En contraste con los canales asociados, los poros están distribuidos al azar en el material magneto-calórico.

Cuanto menor es la porosidad del material magneto-calórico más alta puede hacerse la densidad de empaquetado de cada uno de la pluralidad de elementos. La densidad de empaquetamiento se define como la relación del material magneto-calórico con el volumen total de uno de la pluralidad de elementos, es decir, el volumen que incluye el volumen de los canales asociados.

Se desea que la mayor cantidad de fluido de intercambio fluya a través de los canales asociados no el material magneto-calórico. Entonces, puede lograrse una densidad más alta para los materiales magneto-calóricos de la pluralidad de elementos. En los canales asociados están presentes además unas presiones más bajas y unas pérdidas de viscosidad.

Preferentemente, el espaciador poroso entre los elementos es un material poroso con una porosidad mayor que un 25 % con respecto a su volumen, siendo el material poroso preferentemente al menos uno de entre una espuma de colágeno glicosaminoglicano-colágeno, una espuma de politetrafluoroetileno, spontex, y una cerámica de hidroxapatita. En este caso, el espaciador puede actuar además como una estructura de mezcla para el fluido de intercambio y ayudar a reducir la pérdida de HE. El espaciador puede adaptarse también a las irregularidades en las placas, por lo tanto se reducen los requisitos de planeidad de las placas.

En un ejemplo adicional de un álabe de múltiples materiales, cada uno de la pluralidad de elementos está formado por una placa perforada, en la que una pluralidad de perforaciones en las placas perforadas forma la pluralidad de canales asociados.

Este ejemplo permite unas placas más gruesas a usarse para superar las limitaciones de fabricación mencionadas anteriormente, aunque transfiriendo el problema a hacer suficientes perforaciones finas. En este caso, un elemento puede considerarse como una (o más) placas perforadas con la misma temperatura de Curie T_c .

En la geometría de placa paralela, el espesor de placa más preferido está en el intervalo de 90 μm a 400 μm . Estas dimensiones pueden ser difíciles de fabricar con precisión o de manera fiable en ciertos materiales. Usando placas perforadas, el espesor de placa puede ser considerablemente mayor (en un orden de magnitud), y el límite superior se determina por los criterios de selección de materiales relacionados con la "longitud" necesaria para maximizar la capacidad de refrigeración indicada anteriormente.

Preferentemente, la pluralidad de perforaciones son una pluralidad de agujeros redondos y/o angulares, un diámetro o anchura de cada uno de la pluralidad de agujeros está en un intervalo de 10 μm a 150 μm , preferentemente de 15 μm a 110 μm , o más preferentemente de 20 μm a 85 μm . La distancia entre agujeros adyacentes está en un intervalo de 60 μm a 2000 μm , preferentemente 80 μm a 1000 μm , o más preferentemente de 100 μm a 650 μm . Las escalas de longitud dadas son de nuevo en cierto modo dependientes de los materiales magneto-calóricos que se usan. Sin embargo, los valores preferidos logran la pérdida de HE más baja, y la mejor transferencia de calor desde las placas al fluido de intercambio en un motor magneto-calórico de regeneración activa.

Mejoras

La minimización de la pérdida de HE necesita una escala de longitud relativamente pequeña de fabricación, en términos de espaciadores, placas o perforaciones. Para ciertos materiales refrigerantes la fabricación de tales escalas de longitud pequeñas puede ser problemático.

El uso de estructuras de mezcla especialmente diseñadas en los canales asociados para mezclar el fluido de intercambio reduce la pérdida de HE, cuando el álabe de múltiples materiales de la presente invención se utiliza en un motor magneto-calórico de regeneración activa. La mezcla del fluido de intercambio debe realizarse de manera que las pérdidas de presión aumenten con menor rapidez de lo que se produce la reducción de la pérdida de HE. La pérdida de HE puede reducirse significativamente, ya que la adición de estructuras de mezcla aumenta la homogeneidad térmica a través de los canales asociados, y de manera más importante en el centro del canal donde el flujo es más rápido. Por otra parte, la homogeneización de la temperatura en el centro de los canales requiere unos gradientes de temperatura más altos en las paredes lo que aumenta aún más las velocidades de transferencia de calor y permite una frecuencia aumentada de funcionamiento. Se añade una capa de recubrimiento hidrófoba a los canales asociados (con o sin estructura de mezclar) y se hace que produzca una condición de límite de deslizamiento entre el fluido de intercambio y el material magneto-calórico, cuando el fluido de intercambio se impulsa a través de los canales. Por unidad de volumen de fluido de intercambio, la pérdida de HE podría reducirse de este modo en un 10-20 % (o incluso más). Un cristal o plástico fino o una capa similar se añade adicionalmente por debajo de la capa de recubrimiento hidrófoba, con el fin de aumentar la suavidad de la capa de recubrimiento hidrófoba. La suavidad soporta la ocurrencia de la condición de límite de deslizamiento. En general, el principal resultado de la reducción de la pérdida de HE del álabe es que el tamaño del canal asociado, el tamaño de la perforación o el tamaño del espaciador puede aumentarse en términos absolutos, lo que simplifica el proceso de fabricación. El aumento de una dimensión tal también puede disminuir las pérdidas de presión y de bombeo para un nivel fijo de la pérdida de HE.

Como alternativa, la escala de longitud de la pluralidad de elementos (espesor de la placa o la separación entre perforaciones) dentro de cada elemento que compone el cuerpo de álabe también podría aumentarse para ayudar a la fabricación, mientras se mantiene la pérdida de HE a un nivel constante.

Por último, incluso la frecuencia de funcionamiento puede aumentarse sin aumentar la pérdida de HE.

Tal reducción de la pérdida de HE puede lograrse de varias maneras.

Preferentemente, se proporciona una textura superficial al menos en la parte superior de cada una de la pluralidad de placas como una estructura de mezcla de fluidos, y/o se proporciona una capa de recubrimiento hidrofóbica a cada una de la pluralidad de placas, en las que se proporciona preferentemente una capa de vidrio o de plástico por debajo de cada capa de recubrimiento hidrófoba. La adición de la textura de superficie aumenta la homogeneidad térmica a través de los canales asociados, y reduce la pérdida de HE cuando se usa el álabe en un motor magneto-calórico de regeneración activa. La capa de recubrimiento hidrofóbica reduce la pérdida de HE creando una condición de límite de deslizamiento entre su superficie y el fluido de intercambio. La capa de vidrio o de plástico puede aumentar la suavidad de las placas antes de aplicar la capa de recubrimiento. La capa de recubrimiento puede ser más suave también, y por lo tanto más eficaz.

Preferentemente, la textura de superficie se imprime mediante unas técnicas de impresión de chorro de tinta o se forma a partir de arena o un material áspero similar a la arena equivalente que se pega a la pluralidad de placas. Ambas soluciones son fáciles de conseguir y son soluciones de bajo coste con la estabilidad mecánica necesaria.

Preferentemente, se inserta un interruptor de simetría como una estructura de mezcla de fluidos en cada uno de la pluralidad de agujeros o canales, y/o una pared interior de cada uno de la pluralidad de agujeros tiene una superficie áspera que sirve como estructura de mezcla de fluidos. La pared interior de cada uno de la pluralidad de agujeros está provista de una capa de recubrimiento hidrófoba, que está en la parte superior de una capa de vidrio o de plástico. Las estructuras de mezcla son para mezclar el fluido de intercambio en un motor magneto-calórico de regeneración activa, y aumentar la homogeneidad térmica del fluido de intercambio en los canales asociados. En consecuencia, se reduce la pérdida de HE. También la capa de recubrimiento hidrófoba ayuda a reducir la pérdida de HE, ya que se crea una condición de deslizamiento entre la superficie del canal y el fluido de intercambio.

Como alternativa, tales interruptores de simetría, superficies ásperas o capas de deslizamiento hidrofobas, pueden permitir unos agujeros más grandes que pueden ser más fáciles de fabricar en función del material magneto-calórico, sin aumentar la pérdida de HE.

En todos los ejemplos se proporcionan preferentemente unos separadores entre los adyacentes de la pluralidad de elementos, con el fin de compensar los gradientes de temperatura locales en las interfaces de la pluralidad de elementos en un motor magneto-calórico de regeneración activa.

La presente invención de un álabe de múltiples materiales también puede aplicarse a los materiales electro-calóricos. Los principios de diseño óptimos descritos para el AMR se transfieren de manera equivalente al AER para la transferencia de motores electro-calóricos (aunque algunas de las geometrías resultantes serán diferentes).

La presente invención del álabe de múltiples materiales para su uso en un motor térmico puede aplicarse a las aplicaciones (usando el motor térmico mencionado) destinadas al bombeo de calor, la recuperación de energía a partir del calor residual, así como a la refrigeración y el enfriamiento.

Fabricación

La presente invención se refiere además a un método para fabricar un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. El método comprende las etapas de formar un cuerpo de álabe a partir de una pluralidad de elementos hechos a partir de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos, en el que la pluralidad de elementos está dispuesta a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe. El método comprende además las etapas de formar una pluralidad de canales asociados, que penetran en el cuerpo de álabe y que se extienden a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe, y dotarse cada uno de la pluralidad de canales asociados con una capa de recubrimiento hidrófoba, en el que se proporciona una capa de vidrio o de plástico por debajo de la capa de recubrimiento hidrófoba.

El método logra fabricar un álabe de múltiples materiales que puede usarse como un AMR en un motor magneto-calórico de regeneración activa, y se mejora específicamente en términos de reducción de la pérdida de HE en el sistema.

La presente invención se refiere además a un método para fabricar un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. El método comprende las etapas de formar un cuerpo de álabe a partir de una pluralidad de elementos fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos, en el que la pluralidad de elementos está dispuesta a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe. El método comprende además las etapas de formar una pluralidad de canales asociados, que penetran en el cuerpo de álabe y que se extienden a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe, en el que cada uno de la pluralidad de elementos se forma apilando una pluralidad de placas en la parte superior de cada otra, en el que la pluralidad de placas están separadas entre sí por al menos un espaciador impreso con técnicas de impresión de chorro de tinta (o de impresión de plantilla/pantalla, fotolitografía, o de aplicación directa por un sistema de punteo o de chorro), y sujetando y/o pegando entre sí la pluralidad de placas, en el que cada uno de la pluralidad de placas se forma alineando unas sub-placas hechas de un material magneto-calórico o electro-calórico en un marco, aplicando unas tiras y/o puntos a las sub-placas, y cociendo las sub-placas alineadas y el marco para formar la pluralidad de placas. El método es compatible con un proceso de fabricación de bajo coste automatizado. Se hace posible un motor de regeneración comercialmente viable de coste competitivo.

Los métodos pueden comprender adicionalmente unas etapas de fabricación, en particular las etapas que forman o logran cualquier estructura ventajosa y adecuada del álabe de múltiples materiales descrito en el presente documento. Los diferentes ejemplos y estructuras del álabe de múltiples materiales pueden combinarse además para lograr una combinación de características ventajosas. Por ejemplo, todos los álabes de múltiples materiales descritos anteriormente podrían formarse con una forma curvada para lograr un diseño de álabe evolvente.

A continuación, la presente invención se describirá con más detalle en referencia a los dibujos adjuntos.

- 35 La figura 1a ilustra cómo el efecto magneto-calórico puede utilizarse en un motor magneto-calórico simple.
- La figura 1b ilustra cómo funciona el motor magneto-calórico regenerativo.
- La figura 2 muestra la temperatura en función del ciclo de la entropía, de un refrigerante magnético.
- La figura 3 muestra un álabe de múltiples materiales de acuerdo con un primer ejemplo de la presente invención.
- 40 La figura 4 muestra uno de una pluralidad de elementos de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el primer ejemplo.
- La figura 5 muestra una estructura de mezcla de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el primer ejemplo.
- 45 La figura 6 muestra una estructura de mezcla de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el primer ejemplo.
- La figura 7 muestra uno de una pluralidad de elementos de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con la primera realización.
- La figura 8 muestra un álabe de múltiples materiales de acuerdo con un segundo ejemplo de la presente invención.
- 50 La figura 9 muestra uno de una pluralidad de elementos de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el segundo ejemplo.
- La figura 10 muestra un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el segundo ejemplo.
- La figura 11 muestra una estructura de mezcla de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el segundo ejemplo.
- 55 La figura 12 muestra una estructura de mezcla de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el segundo ejemplo.
- La figura 13 muestra un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el segundo ejemplo.
- La figura 14 muestra un elemento electro-calórico de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con un tercer ejemplo de la presente invención.
- 60 La figura 15 muestra uno de una pluralidad de elementos de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el tercer ejemplo.
- La figura 16 muestra un diseño evolvente de unos álabes de múltiples materiales de acuerdo con un cuarto ejemplo de la presente invención.
- 65 La figura 17 muestra las etapas de fabricación de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con el primer ejemplo de la presente invención.

Descripción detallada de la invención

Como se ha descrito anteriormente el álabe de múltiples materiales de acuerdo con la presente invención comprende un cuerpo de álabe 1 que está hecho a partir de una pluralidad de elementos 2 hechos a partir de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos. El cuerpo de álabe se divide a lo largo de su longitud en la pluralidad de elementos 2. A través del cuerpo de álabe 1 discurre una pluralidad de canales asociados 3, que se extienden a lo largo de toda la longitud del álabe. La pluralidad de canales asociados 3 penetra en el cuerpo de álabe 1, de tal manera que en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa, puede bombearse un fluido de intercambio a través de los canales asociados 3 desde un extremo del álabe al otro. A continuación, la presente invención presentará varios ejemplos y diseños de un álabe de múltiples materiales. Los ejemplos pueden combinarse cuando sea posible, con el fin de lograr unas características combinadas ventajosas. Algunos principios son válidos para todos los ejemplos, pero no se repiten en el mismo detalle una y otra vez.

La figura 3 muestra un primer ejemplo de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con la presente invención que se va a usar en un motor magneto-calórico de regeneración activa. En la figura 3 cada uno de la pluralidad de elementos 2 se fabrica mediante una técnica de apilamiento, en el que los elementos 2 están alineados adyacentes y se sujetan y/o se pegan entre sí, con el fin de formar el cuerpo de álabe 1. Como se muestra en la figura 4, cada uno de la pluralidad de elementos 2, de nuevo, consiste en una pluralidad de placas 4, que se apilan una encima de la otra, y que están separadas por espaciadores 5. Los espaciadores 5 definen obviamente unos huecos entre las placas adyacentes 4, y forman unos canales asociados 3 a través de cada uno de los elementos 2 y a través de todo el cuerpo de álabe 1.

Cada placa 4 está hecha de un material magneto-calórico, en el que las placas de un elemento 2 están hechas preferentemente del mismo material. Sin embargo, puede usarse también una variación de materiales para las placas 4 de un elemento 2. Un grupo preferido de materiales es LaFeSi, LaFeSiCo, LaFeSiH, MnPFeAs, MnPFeSi, MnAsSb, MnPFeGe, Gd, GdDy, CoMnSi, CoMnGe, y GdSiGe, que puede contener diversos agentes de dopado o relaciones de los elementos indicados. Cada uno de la pluralidad de elementos 2 comprende al menos un material magneto-calórico diferente en comparación con los otros elementos, o comprende al menos un material que difiere en su temperatura de Curie T_c . Por ejemplo, una diferencia en la temperatura de Curie puede lograrse mediante diferentes dopajes del mismo material.

Cada placa 4 tiene un espesor de aproximadamente 50 μm a 1500 μm , preferentemente de 70 μm a 700 μm , más preferentemente de 90 μm a 400 μm . Los valores dependen ligeramente del material magneto-calórico usado. Todas las placas 4 de cada elemento 2 pueden tener el mismo tamaño y forma, como se muestra en la figura 4, pero también pueden ser diferentes unas de otras, por ejemplo, con el fin de implementar una curvatura del álabe. Para formar un cuerpo de álabe envolvente todas las curvaturas son las mismas.

Las placas 4 que se muestran en la figura 4 tienen una forma rectangular, pero esto no es en modo alguno limitativo, y pueden imaginarse otras formas, como cuadrados, triángulos o círculos. Las placas 4 también se muestran como que son planas, pero, como se describirá más adelante en relación con la figura 16, las placas 4 pueden presentar también una curvatura en cualquiera de sus superficies. La curvatura puede ser convexa o cóncava. Las placas 4 pueden hacerse mediante unas técnicas de extrusión, en las que los polvos magneto-calóricos están unidos entre sí por algún tipo de aglutinante para formar una placa sólida 4. Naturalmente las placas 4 pueden estar hechas también de bloques sólidos de un solo material magneto-calórico, o una aleación de materiales magneto-calóricos.

En cualquier caso, las placas 4 tienen una conductividad térmica que es lo más baja posible en un intervalo de 0,1 W/mK a 10 W/mK, preferentemente de 0,1 W/mK a 5 W/mK, más preferentemente de 0,1 W/mK a 2 W/mK. Entonces, también cada uno de la pluralidad de elementos 2 tendrá una baja conductividad térmica. En el caso de que las placas 4 se fabriquen mediante polvos extruidos que se mezclan con aglutinantes, los aglutinantes deberían tener una conductividad térmica que sea menor o igual que la de los materiales magneto-calóricos. En consecuencia, se prefieren unos materiales como el plástico a los metales para el agente aglutinante. La baja conductividad térmica de las placas 4 y de la pluralidad de elementos 2, respectivamente, minimiza las pérdidas en el motor magneto-calórico de regeneración activa que se provocan por el reflujo del calor a través del álabe de múltiples materiales. Téngase en cuenta que los separadores entre los adyacentes de la pluralidad de elementos 2 no reducirán el reflujo como un % de la potencia de refrigeración total. Sin embargo, pueden usarse los separadores entre los adyacentes de la pluralidad de elementos 2 con fines de montaje, y para reducir los gradientes de temperatura locales entre los materiales adyacentes.

Los espaciadores 5, que definen los canales asociados 3 a través del cuerpo de álabe 1, tienen un espesor de 5 a 100 μm , preferentemente de 10 μm a 75 μm , más preferentemente de 15 a 60 μm . Los valores dependen de nuevo del material magneto-calórico de las placas 4, y también del fluido de intercambio que discurre a través de los canales asociados 3 en un motor de regeneración activa. Idealmente, los espaciadores 5 son tan pequeños como es posible, ya que unos canales más estrechos 3 experimentan una pérdida de HE menor. Sin embargo, un compromiso entre la pérdida de HE y las pérdidas de viscosidad y de presión tiene que tenerse en cuenta. Los espaciadores se hacen preferentemente de un material de baja conductividad térmica, que se encuentra en el intervalo dado anteriormente para los materiales magneto-calóricos o inferior. La pluralidad de elementos 2 en la figura 3 pueden alinearse a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe 1, de tal manera que cada uno de la pluralidad de elementos 2 se hace girar 90° con respecto a los elementos 2 adyacentes a los mismos. Por supuesto, puede elegirse cualquier otro ángulo. El flujo del fluido de intercambio será de una manera que el fluido de intercambio se mezcla, con el fin de reducir aún más la pérdida de HE.

En un motor magneto-calórico de regeneración activa, un extremo del cuerpo de ábabe 1 es el extremo frío y el otro es el extremo caliente. Un fluido de intercambio se hará pasar a través de los canales asociados 3 desde el extremo caliente al extremo frío y desde el extremo frío al extremo caliente, cuando se aplica o se quita un campo magnético del ábabe de múltiples materiales, según sea apropiado. Después de que el fluido de intercambio ha pasado a través

de varios ciclos de bombeo, se establece un gradiente de temperatura desde el extremo frío del cuerpo de ábabe 1 hasta el extremo caliente del mismo. El gradiente de temperatura total depende del diseño del ábabe, en particular de la selección y la disposición de los materiales magneto-calóricos. La pluralidad de elementos 2 que forman el cuerpo de ábabe 1 se hacen por lo tanto de tales materiales magneto-calóricos, y/o dopados de tal manera, que pueden disponerse a lo largo del cuerpo de ábabe de manera que las temperaturas Curie de los materiales magneto-calóricos en cada uno de los elementos 2 trazan el gradiente de temperatura que se establece a través de toda la longitud del cuerpo de ábabe 1. El gradiente de temperatura es preferentemente lineal, lo que requiere una adaptación de las temperaturas de Curie, la longitud, y el lapso de temperatura de cada uno de la pluralidad de elementos. Cada uno de la pluralidad de elementos 2 se dispone además en una posición, en la que funciona tan cerca de su temperatura de Curie como es posible. La pluralidad de elementos 2 puede tener diferentes longitudes o puede tener la misma longitud, en la dirección de los canales asociados 3. Las temperaturas de Curie, la longitud y el cambio de temperatura ΔT a través de cada uno de la pluralidad de elementos 2 debería seleccionarse preferentemente de tal manera que la capacidad de refrigeración esté cerca de la uniformidad, en la que uniformidad se entiende que tienen una desviación de $\pm 30\%$, preferentemente de $\pm 20\%$, más preferentemente de $\pm 10\%$ inmediatamente entre los elementos localizados a lo largo de la longitud del cuerpo de ábabe 1, es decir, en los límites de dos elementos.

Los gradientes de temperatura locales pueden establecerse en el cuerpo de ábabe 1, entre los elementos, y generar una entropía que interrumpa el rendimiento de cualquier motor magneto-calórico de regeneración activa. El calor no puede entonces transferirse de manera óptima desde la pluralidad de elementos hasta el fluido de intercambio. Para contrarrestar este efecto, pueden usarse los espaciadores o separadores entre todos o algunos de la pluralidad de elementos 2 por razones de montaje, y para reducir los gradientes de temperatura locales que puedan surgir entre las sub-láminas que poseen diferente ΔT en el límite entre los dos materiales. La disposición anterior de los materiales magneto-calóricos (y también de los materiales electro-calóricos) es válida para todos los ejemplos de un ábabe de múltiples materiales de acuerdo con la presente invención.

La figura 5 muestra una de dicha pluralidad de placas 4, en la que se imprimen dos espaciadores 5. El espaciador 5 puede imprimirse mediante técnicas de impresión de chorro de tinta, lo que permite un bajo coste y una fabricación automatizada. Los espaciadores pueden por supuesto imprimirse o pegarse mediante otras técnicas. El número de espaciadores 5 no se requiere que sea dos, pero al menos un espaciador 5 debería estar presente. Además, una textura de superficie 6 puede imprimirse, por ejemplo, mediante técnicas de impresión de chorro de tinta, o aplicarse de otro modo a la una o ambas superficies de algunas o todas las placas 4. La adición de una textura de superficie 6 aumenta la homogeneidad térmica a través del canal asociado respectivo 3, cuando el fluido de intercambio se bombea a través del canal 3 en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa. La mezcla del fluido de intercambio reduce la pérdida de HE, y por lo tanto aumenta el rendimiento global del motor. La forma y las dimensiones de la textura de superficie 6 pueden ser diferentes de las mostradas en la figura 5.

Como alternativa a, o además de, la textura de superficie 6, se imprime o de otro modo se aplica una capa de recubrimiento hidrófoba sobre alguna o cada una de las placas 4. La capa de recubrimiento hidrófoba puede estar en ambas o en una superficie de las placas 4. La capa de recubrimiento hidrófoba y la textura de superficie 6 pueden estar, por ejemplo, en superficies opuestas de una placa 4. Además, una capa delgada de vidrio o de plástico está dispuesta por debajo de cada capa de recubrimiento hidrófoba. La capa de recubrimiento hidrófoba crea una condición de límite de deslizamiento entre la superficie de la placa 4, es decir, la superficie del canal asociado 3 y el fluido de intercambio, cuando el ábabe se usa en un motor magneto-calórico de regeneración activa. La condición de límite de deslizamiento sirve para reducir la pérdida de HE. Otra estructura de mezcla que puede aplicarse con una placa apilada 4 se muestra en la figura 6. En lugar de los espaciadores de impresión y/o la textura de superficie 6 con, por ejemplo, técnicas de impresión por chorro de tinta, se tamizan con polvo de arena a la escala de longitud correcta, y se forman y se pegan a la placa 4 unas estructuras de arena de bordes afilados. Las estructuras de arena de bordes afilados sirven tanto como espaciadores 5 como una estructura de mezcla 6. Las estructuras se utilizan para definir la anchura de los canales asociados 3 y para reducir la pérdida de HE. Preferentemente, los materiales de baja conductividad térmica (es decir, menor que la conductividad térmica de los materiales magneto-calóricos) debería usarse para el polvo o la arena, mientras que se mantiene la conductividad térmica de cada uno de la pluralidad de elementos 2 lo más pequeña posible por las razones descritas anteriormente.

La figura 7 muestra uno de una pluralidad de elementos 2 de otro segundo ejemplo de la presente invención. El ejemplo es similar a y compatible con el primer ejemplo, ya que de nuevo las placas 4 pueden apilarse para formar la pluralidad de elementos 2. El cuerpo de ábabe 1 de la segunda realización presenta una sección transversal que tiene unas regiones de diferente porosidad en una dirección, que es en la figura 7 la dirección vertical. Las regiones de diferente porosidad están separadas unas de otras y se definen por un salto repentino de la porosidad que es al menos de un 10 %, pero es preferentemente al menos de un 20 %, más preferentemente al menos de un 30 %. En la figura 7 las placas 4 que representan las regiones de baja porosidad (la porosidad puede incluso ser cero, pero también puede ser de valor finito) se apilan alternativamente una encima de otra con capas porosas 19 en el medio. Las capas porosas 19 forman los canales asociados 3, así como los espaciadores 5. El fluido de intercambio fluiría preferentemente a través de la región con la mayor porosidad (estructura abierta), en el caso de la figura 7 las capas 19 entre las placas 4. Sin embargo una cierta cantidad de fluido de intercambio también podría fluir a través de la

región de menor porosidad. El material magneto-calórico tiene preferentemente menos de un 10 % de porosidad, lo que también es cierto para los materiales magneto-calóricos usados en todas las otras realizaciones.

Son posibles muchos diseños de regiones de diferente porosidad en el cuerpo de álabe 1. El cuerpo de álabe 1 puede presentar al menos dos regiones de diferente porosidad a lo largo de su dirección vertical o su dirección horizontal, pero también puede tener varias regiones de porosidad diferente, e incluso cada región puede tener una porosidad diferente. La sección transversal de cada uno de la pluralidad de elementos 2 del cuerpo de álabe no tiene necesariamente que ser la misma. También el número de regiones de mayor y/o menor porosidad puede diferir de elemento 2 a elemento 2.

Las regiones de diferente porosidad pueden diseñarse de tal manera que sirven como una estructura de mezcla 6, lo que reduce la pérdida de HE en un sistema de refrigerante. Además, las diferentes porosidades pueden usarse para controlar la presión en el álabe de múltiples materiales, y por lo tanto para controlar y reducir las pérdidas de viscosidad. La capa porosa 19 mostrada en la figura 7 tiene una anchura vertical preferida de 15 a 80 μm , como máximo 125 μm , en función de la porosidad. El material de la capa porosa 19 puede ser, por ejemplo, unas matrices de glicosaminoglicanos de colágeno o spontex. Además, pueden usarse espuma de colágeno, politetrafluoroetileno o cerámica de hidroxiapatita. Las porosidades están preferentemente en un intervalo del 25 al 95 %. Los tamaños de poro están preferentemente en un intervalo de 1 μm a 100 μm . La cerámica de hidroxiapatita presenta micro-poros. El tamaño de los microporos es preferentemente de 0,1 a 10 μm . Al menos una región de alta porosidad puede hacerse flexible, por ejemplo, como una estructura similar a una esponja que puede adaptar su tamaño y forma. Por lo tanto, los requisitos de planeidad de las placas 4 pueden reducirse para montar la pluralidad de elementos apilados del cuerpo de álabe 1.

La figura 8 muestra otro tercer ejemplo de un álabe de múltiples materiales de acuerdo con la presente invención. De nuevo, el cuerpo de álabe 1 consiste en una pluralidad de elementos 2 y canales asociados 3. La figura 9 muestra una placa perforada 7 que forma uno de la pluralidad de elementos 2 de la figura 8. Una pluralidad de placas perforadas 7 se alinean a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe 1, y los canales asociados 3 discurren a través de todas las placas 7. Para este fin, cada álabe perforado 7 comprende unas perforaciones 9, como se muestra en la figura 8. La placa perforada 7 puede producirse mediante una perforación, una extrusión o un proceso de prensado o a través de otras técnicas de procesamiento de polvo. Los agujeros pueden ser angulares, rectangulares o redondos, o pueden tener cualquier otra forma. El diámetro de cada agujero puede optimizarse, y es idealmente de 10 a 150 μm , preferentemente de 15 a 110 μm o más preferentemente de 20 μm a 85 μm . La distancia entre dos agujeros adyacentes está preferentemente en un intervalo de 60 μm a 2 mm, más preferentemente de 80 a 1000 μm , más preferentemente de 100 μm a 650 μm . Las escalas de longitud dependen del material magneto-calórico, del que se hace cada una de las placas perforadas 7, pero son equivalentes a los requisitos de escala de longitud de los canales asociados 3 descritos en el primer ejemplo. Las placas perforadas 7 se muestran como que son de forma rectangular o cuadrada, pero pueden tener también otras formas. Las placas perforadas 7 se muestran de nuevo como placas planas 7, pero, como se describirá más tarde, las placas perforadas 7 también pueden presentar una curvatura o un ángulo de flexión.

Cuando las placas perforadas 7 se apilan juntas, como se muestra en la figura 8, idealmente sin espaciadores, se usan simplemente para tratar de minimizar la pérdida de reflujo. Sin embargo, los espaciadores podrían usarse si es necesario, para permitir incluso más apilamiento, y una reducción de los gradientes de temperatura locales. Preferentemente, cada una de las placas perforadas 7 tiene una muesca de alineación de tal manera que el montaje del cuerpo de álabe 1 es simple y fiable. Cada placa perforada 7 se hace, de nuevo, de un material magneto-calórico diferente, que puede seleccionarse del mismo grupo de materiales descrito en el primer ejemplo. Los requisitos para seleccionar las temperaturas de Curie de cada uno de la pluralidad de elementos 2 son los mismos que los mencionados anteriormente.

Si las técnicas de producción, como la extrusión o el prensado, con las que se fabrican las placas perforadas 7, funcionan solo para los agujeros más grandes que los que se usan preferentemente en el álabe de múltiples materiales, entonces pueden aplicarse adicionalmente unas inserciones de tubo, con el fin de optimizar el flujo de los fluidos de intercambio a través de los canales asociados 3. De este modo, puede minimizarse la pérdida de HE. La figura 10 muestra unas inserciones de tubo 10 que se insertan en cada uno de la pluralidad de agujeros 9, con el fin de reducir su diámetro, y por lo tanto reducir la pérdida de HE. Las inserciones de tubo 10 pueden incluso tener diámetros diferentes, de tal manera que no todos los canales asociados 3 tienen el mismo diámetro. Los tubos 10 se hacen preferentemente de un material con una baja capacidad térmica, y una baja conductividad térmica (por ejemplo, el vidrio). La conductividad térmica de cada uno de la pluralidad de elementos 2, es decir, de cada placa perforada 7 debería encontrarse en un intervalo de 0,1 W/mK a 10 W/mK, preferentemente de 0,1 W/mK a 5 W/mK, más preferentemente de 0,1 W/mK a 2 W/mK. Las razones se han descrito anteriormente.

En cada uno de los tubos 10 o en cada uno de los agujeros 9, pueden insertarse los interruptores de simetría o de flujo 13. Como puede verse en la figura 11, estos interruptores de simetría 13 actúan como estructuras de mezcla, y pueden, por ejemplo, extenderse longitudinalmente en espirales que discurren a través de los canales asociados 3. Los interruptores de simetría 13 soportan la mezcla del fluido de intercambio, cuando se bombea a través de los canales asociados 3, y ayudan de este modo a reducir la pérdida de HE. Los interruptores de simetría se hacen preferentemente de un material de capacidad térmica más baja, como el plástico, de tal manera que el calor se transfiere en gran parte al fluido de intercambio cuando los materiales magneto-calóricos cambian la temperatura, y de un material de baja conductividad térmica, es decir, no más alta que la conductividad térmica del material

magneto-calórico. Esto es para mantener la conductividad térmica total de las placas perforadas 2 lo más baja posible.

5 Otra posibilidad para proporcionar una estructura de mezcla que reduzca la pérdida de HE son las paredes ásperas 11 en el interior de algunos o de cada uno de los agujeros 9 o de las inserciones de tubería 10, respectivamente. La figura 12 muestra la aspereza de la parte interior de las paredes 11. La aspereza se sintoniza preferentemente para minimizar la pérdida de presión y la pérdida de HE al mismo tiempo. Debido a las paredes ásperas un agujero de mayor diámetro 9 o un tubo de pared delgada 10 pueden usarse sin aumentar la pérdida de HE. La aspereza puede producirse por ranuras, salientes, dientes, u otros patrones de aspereza.

10 Una alternativa para reducir la pérdida de HE se muestra en la figura 13. El interior de los agujeros 9 o las inserciones de tubo 10 están provistos de una capa de recubrimiento de deslizamiento. Específicamente, se aplica una capa hidrofóbica a las paredes interiores. También un tubo de vidrio 10 puede insertarse en los agujeros 9. El recubrimiento puede ser una capa de recubrimiento hidrófoba de vidrio convencional. Como se ha descrito anteriormente, la capa de recubrimiento de deslizamiento crea una condición límite de deslizamiento entre el fluido de intercambio y la superficie del canal asociado 3, y reduce la pérdida de HE de manera significativa. Es posible que algunos agujeros 9 estén provistos solo de unas capas de recubrimiento hidrófobas y que algunos otros agujeros estén provistos también de interruptores de simetría 13 o de paredes ásperas. Los interruptores de simetría 13 son incluso compatibles con las capas de recubrimiento en un único agujero 9.

20 El uso de técnicas de reducción de pérdida de HE puede incluso impulsar un sistema más eficiente. Como alternativa, para una pérdida dada, se permiten unos canales o unos agujeros más grandes, que pueden ser más fáciles de fabricar.

25 El álabe de múltiples materiales de la presente invención puede tener también una pluralidad de elementos 2 que están hechos de al menos un elemento electro-calórico 15, que representa un cuarto ejemplo de la presente invención. La figura 14 muestra un elemento electro-calórico 15. El elemento electro-calórico 15 comprende un material electro-calórico 13 que está intercalado entre dos electrodos 14, a los que puede aplicarse una tensión. La estructura del elemento electro-calórico 15 es, por lo tanto, básicamente una estructura de condensador formado en el material electro-calórico 13. El material electro-calórico es similar al material magneto-calórico, excepto en que el material se somete a un cambio de temperatura ΔT que está impulsado por un campo eléctrico en lugar de un campo magnético. Cuando se aplica una tensión a los dos electrodos, se crea un campo eléctrico a través del material electro-calórico, y la temperatura del material 13 cambia. La figura 15 muestra una estructura de condensador multi-capa 16. Esta estructura de condensador multi-capa 16 difiere de la realización mostrada en la figura 14 en que utiliza múltiples capas de un único material electro-calórico 13 separadas por múltiples electrodos 35 14. Esta realización tiene la ventaja de permitir unas capas mucho más delgadas de material electro-calórico, y por lo tanto pueden usarse tensiones más pequeñas, o pueden generarse campos eléctricos de mayor tamaño aumentando de este modo ΔS y ΔT y mejorando la capacidad de refrigeración.

30 El elemento electro-calórico 15 o la estructura de condensador multi-capa 16 puede usarse en la forma de las placas 4 de la figura 4, para hacer unas estructuras multi-capa con 3 canales asociados y unos espaciadores 5.

40 Sin embargo, el elemento electro-calórico 15 y la estructura de condensador multi-capa 16 también pueden tener unas perforaciones o unos agujeros, y cada uno forma uno de la pluralidad de elementos 2 que establecen canales asociados a lo largo del cuerpo de álabe como en la figura 8.

Los electrodos 14 pueden ser electrodos de metal, y son preferentemente un 5 % o menos que el espesor del elemento electro-calórico 15.

45 El álabe de múltiples materiales electro-calórico tiene los mismos requisitos para la elección de los materiales que los álabes de múltiples materiales magneto-calóricos descritos anteriormente. Una temperatura de transición, alrededor de la que hay un cambio en la entropía, debería seguir la temperatura definida por el gradiente de temperatura a lo largo del álabe en un motor electro-calórico de regeneración activa. En principio, la ΔT y ΔS en los materiales electro-calóricos es, en principio, mucho más grande que en los materiales magneto-calóricos. Esto se debe al hecho de que pueden aplicarse campos eléctricos más grandes que los magnéticos, especialmente en las estructuras de condensadores multi-capa. La gran ΔT y ΔS también existe a lo largo de los intervalos de temperatura más amplios, lo que significa que se necesitan menos materiales a lo largo de la longitud de un AER. No obstante, los principios básicos siguen siendo los mismos que para un AMR.

55 Como se ha descrito anteriormente de manera breve, las formas de los álabes de múltiples materiales se han descrito como que son planas. Sin embargo, las formas curvadas son ventajosas cuando se usan los álabes con un sistema rotatorio, es decir, cuando múltiples álabes tienen que empaquetarse y montarse en un círculo. La figura 16 muestra un elemento 2 que tiene una forma curvada, ya que la pluralidad de placas 4 del elemento 2 se compone de una forma curvada. Por lo tanto, el elemento 2 tiene un diseño envolvente, que proporciona la posibilidad de un embalaje perfecto en un círculo completo, con una separación de placas constante dentro de cada elemento, como se muestra en la figura 16. Ya que la separación entre los elementos se mantiene constante, en comparación con un empaquetado de elementos en forma de cuboides en una geometría circular, se necesita un volumen de campo un 30 % más pequeño, ya que la utilización del campo magnético es mucho mayor. Por lo tanto, pueden usarse unos imanes más pequeños y menos costosos en el motor de regeneración activa respectivo. La utilización del campo magnético puede alcanzar hasta el 100 %. Cada elemento todavía puede hacerse de un número de placas individuales, como las placas apiladas 4 de la figura 4 o las placas perforadas 7 de la figura 9. Las placas curvadas

pueden fabricarse mediante una extrusión curvada. También para el diseño evolvente de la figura 16, puede aplicarse unas paredes ásperas o unas texturas de superficie a cada uno de los canales asociados 3, también puede usarse un recubrimiento antideslizante.

5 Múltiples elementos (2) pueden combinarse verticalmente (o radialmente), para crear una estructura de álabe de múltiples materiales (1). En general todos los ejemplos pueden usar las características ventajosas y las mejoras de los otros ejemplos. Los ejemplos pueden combinarse también entre sí.

10 La figura 17 muestra un ejemplo de cómo puede fabricarse un álabe de múltiples materiales de acuerdo con la presente invención, en particular con la primera realización. En general, un cuerpo de álabe 1 está formado por una pluralidad de elementos 2, en el que cada uno de la pluralidad de elementos 2 está hecho de una material magneto-calórico o electro-calórico diferente. La pluralidad de elementos 2 están dispuestos a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe 1, y los canales asociados 3 se crean de manera que penetran en el cuerpo de álabe 1. Por último, se proporcionan una capa de recubrimiento hidrófoba y opcionalmente una estructura de mezcla a cada uno de los canales asociados 3.

15 En la figura 17 cada uno de la pluralidad de elementos 2 se forma apilando una pluralidad de placas 4 en la parte superior de cada otra. Cada una de la pluralidad de placas 4 se forma alineando unas sub-placas 16 en un marco 17, aplicando unas tiras y puntos 18 en las sub-placas y cociendo las sub-placas alineadas 16 junto con el marco 17, con el fin de formar las placas 4. A continuación, las placas 4 se apilan una encima de la otra con unos espacios 5 en el medio, se sujetan o se pegan entre sí, por ejemplo a los lados, y opcionalmente se cubren. Por último la pluralidad de elementos 2 se ponen juntos para formar el cuerpo de álabe 1, en el que preferentemente cada pila se hace girar preferentemente 90° con respecto a sus pilas de placas adyacentes.

25 En resumen, la presente invención describe el diseño y la fabricación de unos álabes de múltiples materiales usados como regeneradores de regeneración activa en los motores magneto-calóricos o electro-calóricos de regeneración activa. Los álabes consisten en una pluralidad de elementos 2 que dividen el cuerpo de álabe a lo largo de su longitud. Cada elemento 2 está hecho de un material magneto-calórico o electro-calórico diferente, y de una pluralidad de canales asociados 3 que penetran en el cuerpo de álabe 1 y se extienden a lo largo de la longitud del álabe. Los canales asociados 3 pueden estar provistos de unas estructuras de mezcla de fluidos, unas capas de poros o unos recubrimientos hidrófobos para reducir la pérdida de HE en un motor de regeneración activa. Los álabes de múltiples materiales pueden obtenerse mediante unas técnicas de chorro de tinta (o equivalentes) con costes reducidos. Los álabes de múltiples materiales puede tener, además, una forma curvada para formar un cuerpo de álabe evolvente 1. Todas las medidas pueden mejorar el rendimiento de los motores magneto-calóricos o electro-calóricos de regeneración activa, y colocar las bases para las soluciones comerciales.

30

REIVINDICACIONES

1. Álabes de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa, siendo el álabe una pila de una pluralidad de elementos (2) y que comprende
 5 un cuerpo de álabe (1) fabricado a partir de la pluralidad de elementos (2), que están fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos, en el que el cuerpo de álabe (1) se divide a lo largo de su longitud en dicha pluralidad de elementos (2);
 una pluralidad de canales asociados (3), que penetran en el cuerpo de álabe (1) y se extienden a lo largo de la longitud del álabe, en el que cada uno de la pluralidad de canales asociados (3) está provisto de una capa de recubrimiento hidrófoba (12), y se proporciona una capa de vidrio o de plástico por debajo de la capa de recubrimiento hidrófoba.
 10
2. Álabe de múltiples materiales de acuerdo con la reivindicación 1, en el que cada uno de la pluralidad de elementos (2) tiene una conductividad térmica en un intervalo de 0,1 W/mK a 5 W/mK, preferentemente de 0,1 W/mK a 2 W/mK.
 15
3. Álabe de múltiples materiales de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 2, en el que dicha pluralidad de elementos (2) están diseñados y dispuestos de tal manera que la temperatura de Curie de los materiales traza un gradiente de temperatura establecido a lo largo del cuerpo de álabe (1) en un motor magneto-calórico de regeneración activa.
 20
4. Álabe de múltiples materiales de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que cada uno de la pluralidad de elementos (2) está formado por una placa perforada (7), en la que una pluralidad de perforaciones (9) en las placas perforadas (7) forman la pluralidad de canales asociados (3).
 25
5. Álabe de múltiples materiales de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la pluralidad de perforaciones son una pluralidad de agujeros redondos y/o angulares (9), en el que un diámetro o anchura de cada uno de la pluralidad de agujeros (9) está en un intervalo de 10 μm a 150 μm , preferentemente de 20 μm a 85 μm , y una distancia entre unos agujeros adyacentes de la pluralidad de agujeros (9) está en un intervalo de 60 μm a 2 mm, preferentemente de 100 μm a 650 μm .
 30
6. Álabe de múltiples materiales de acuerdo con una de las reivindicaciones 4 a 5, en el que un interruptor de simetría (13) se inserta como una estructura de mezcla de fluidos en cada uno de la pluralidad de agujeros (9) y/o
 35 una pared interior de cada uno de la pluralidad de agujeros (9) tiene una superficie áspera (11) que sirve como una estructura de mezcla de fluidos y/o la pared interior de cada uno de la pluralidad de agujeros (9) está provista de la capa de recubrimiento hidrófoba (12).
7. Método para fabricar un álabe de múltiples materiales para su uso en un motor magneto-calórico o electro-calórico de regeneración activa, siendo el álabe una pila de una pluralidad de elementos (2), en el que el método comprende las etapas de
 40 formar un cuerpo de álabe (1) a partir de la pluralidad de elementos (2), que están fabricados de diferentes materiales magneto-calóricos o electro-calóricos, en el que la pluralidad de elementos (2) están dispuestos a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe (1);
 45 formar una pluralidad de canales asociados (3), que penetran en el cuerpo de álabe (1) y se extienden a lo largo de la longitud del cuerpo de álabe (1);
 proporcionar a cada uno de la pluralidad de canales asociados (3) una capa de recubrimiento hidrófoba (12), en el que se proporciona una capa de vidrio o de plástico por debajo de la capa de recubrimiento hidrófoba.

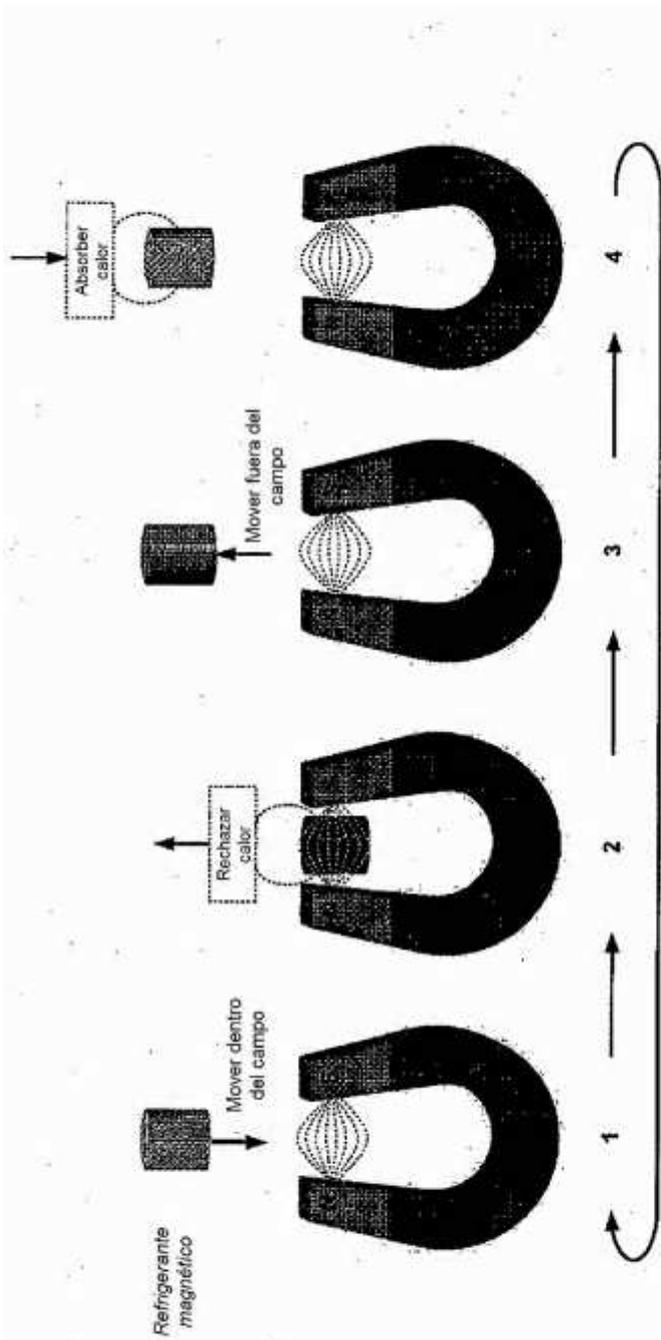


Fig. 1a

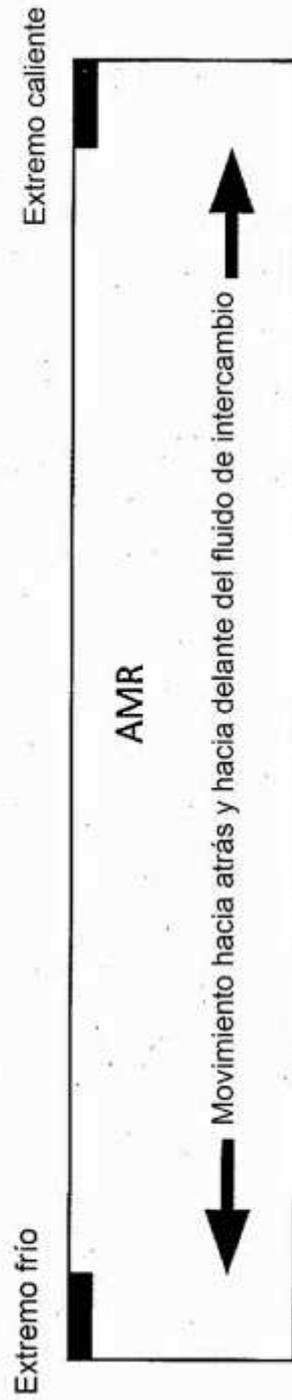


Fig. 1b

Diagrama T-S ilustrativo del refrigerante magnético

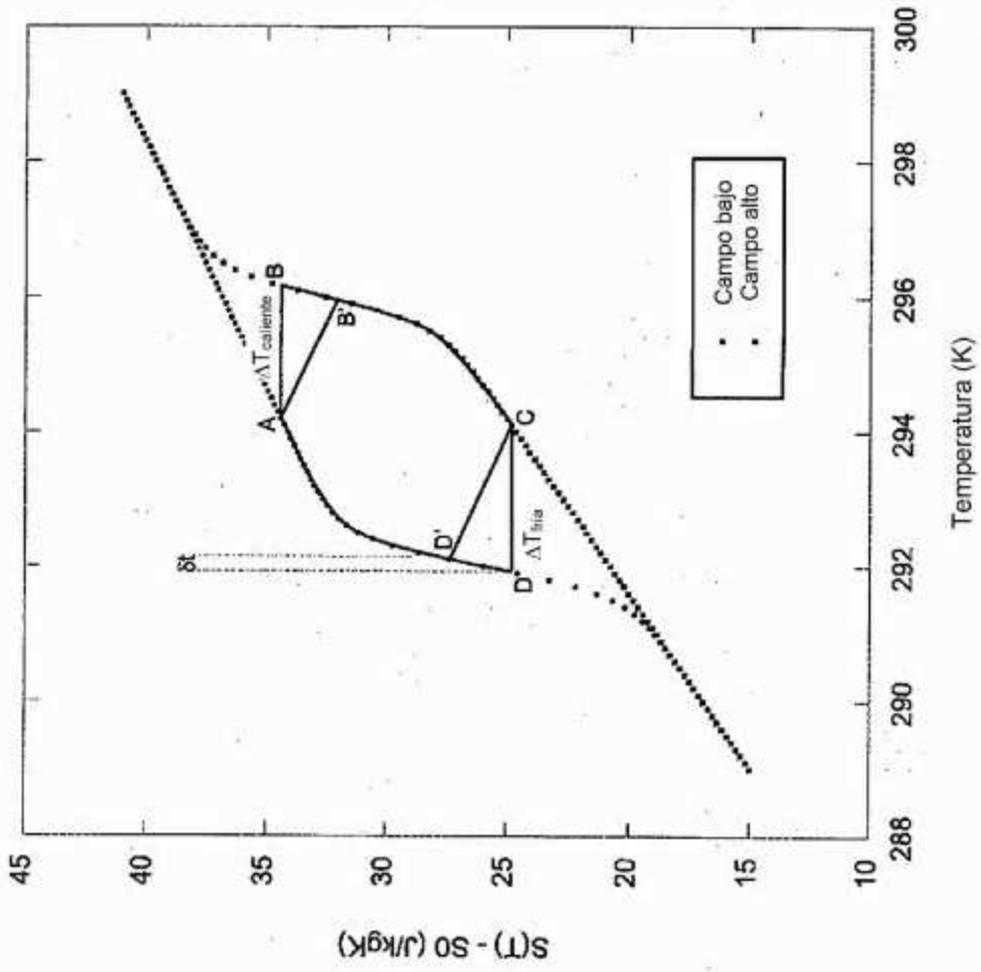


Fig. 2

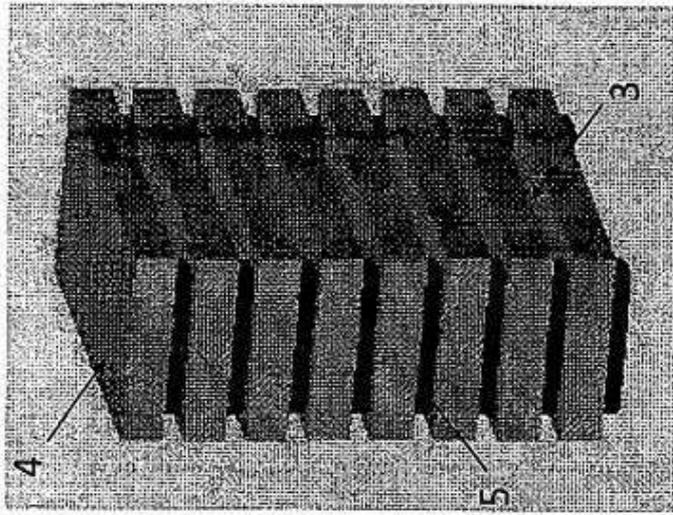


Fig. 4

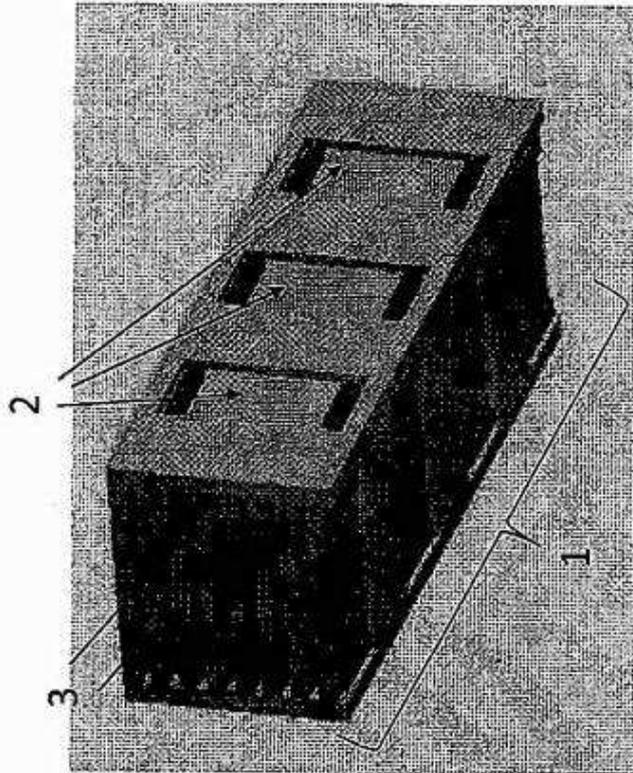


Fig. 3

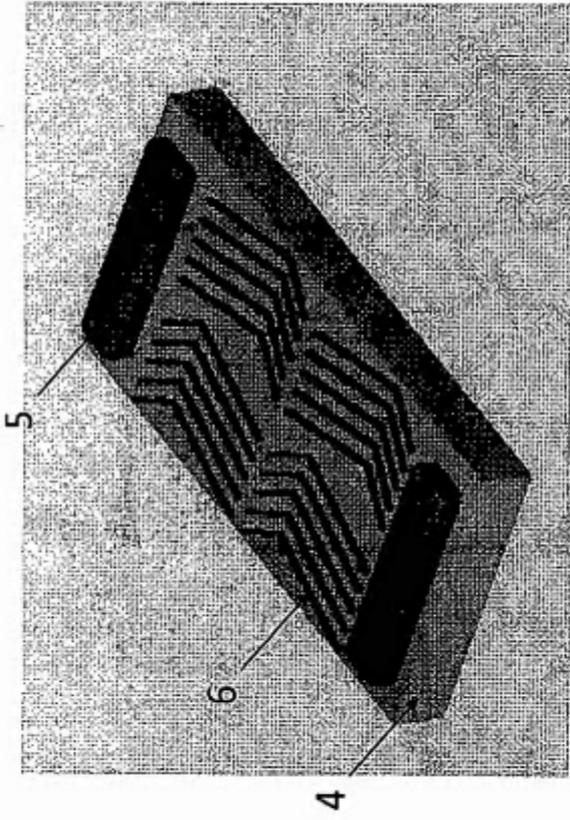


Fig. 5

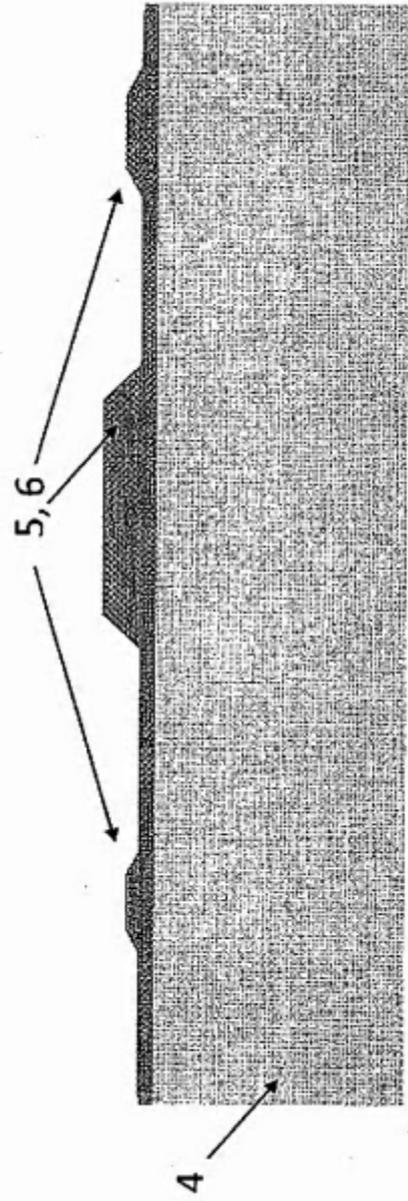


Fig. 6

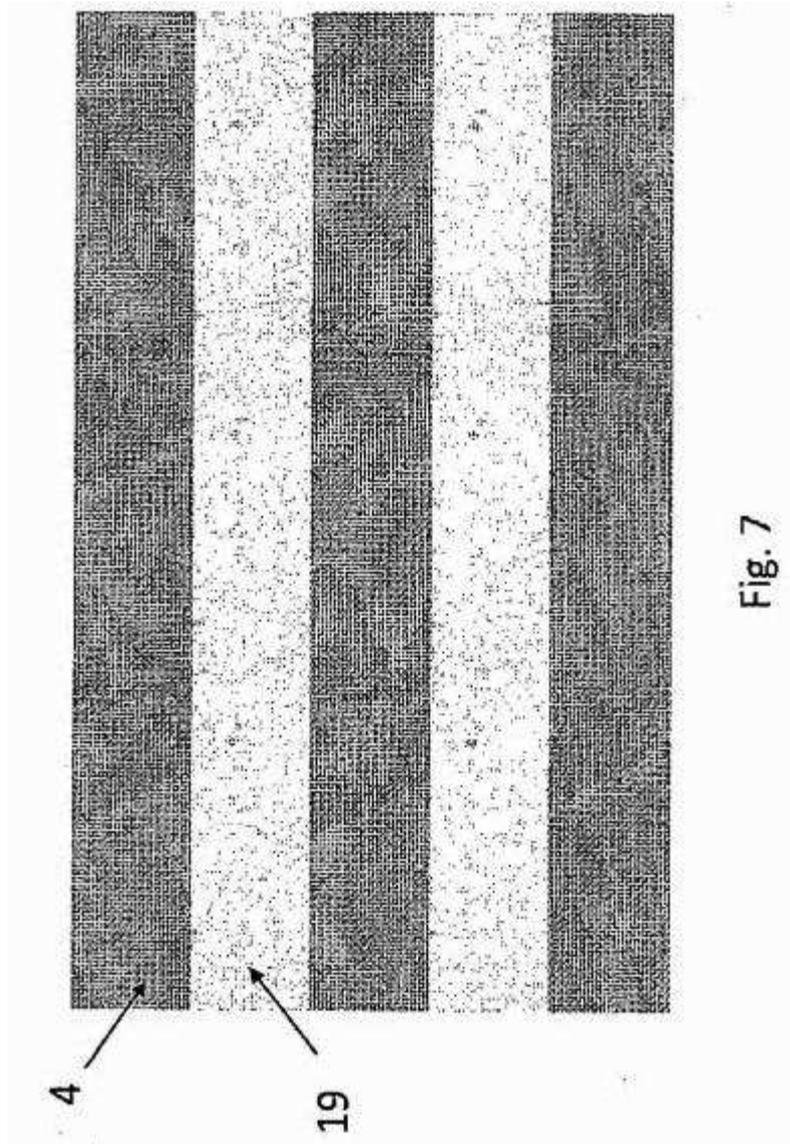


Fig. 7

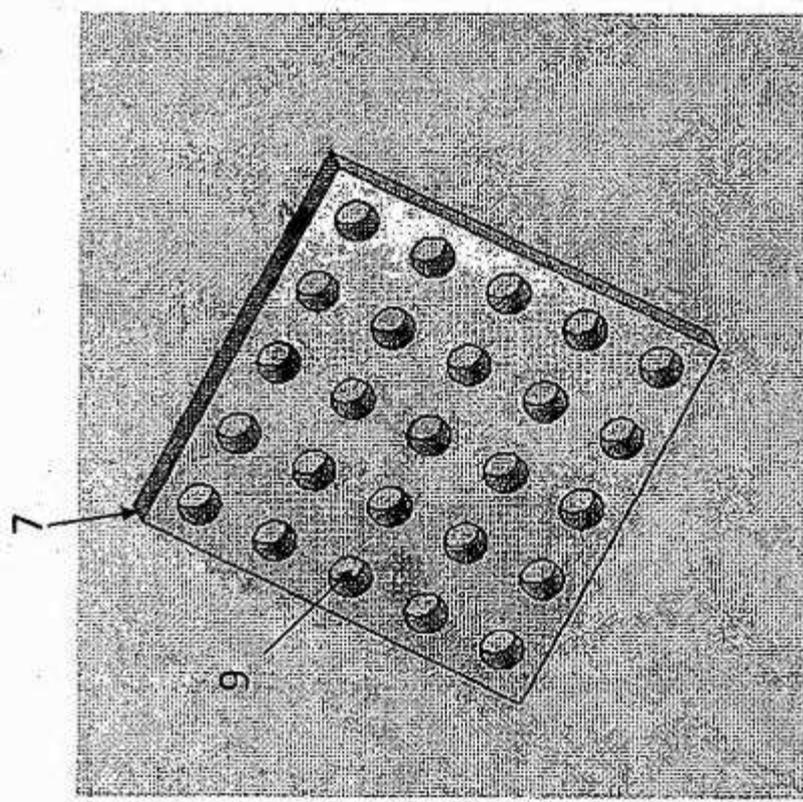


Fig. 9

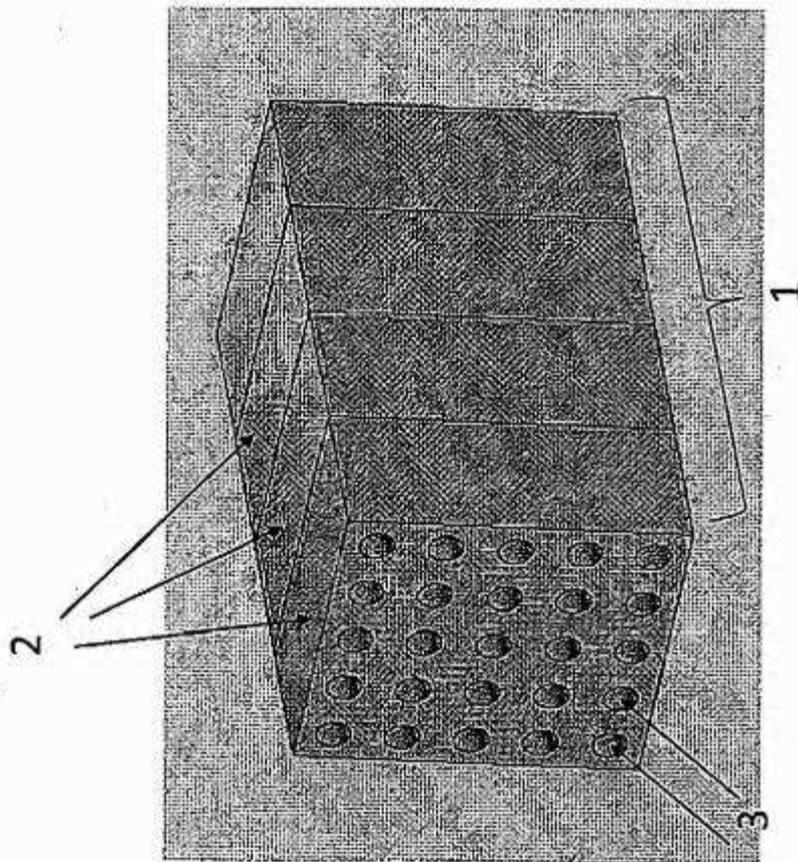


Fig. 8

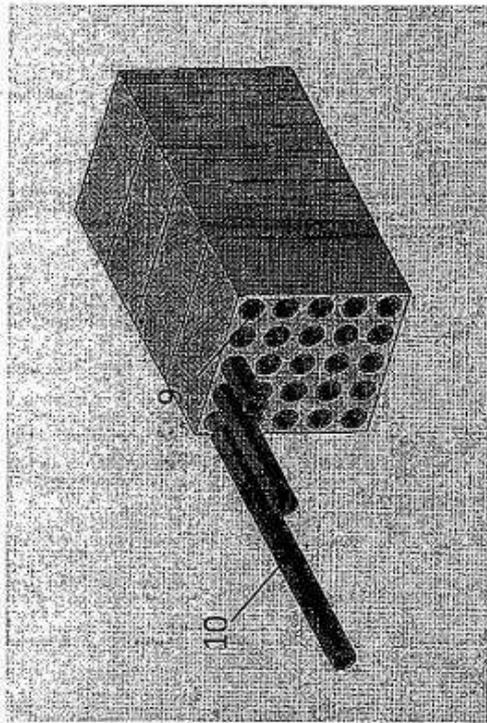


Fig. 10

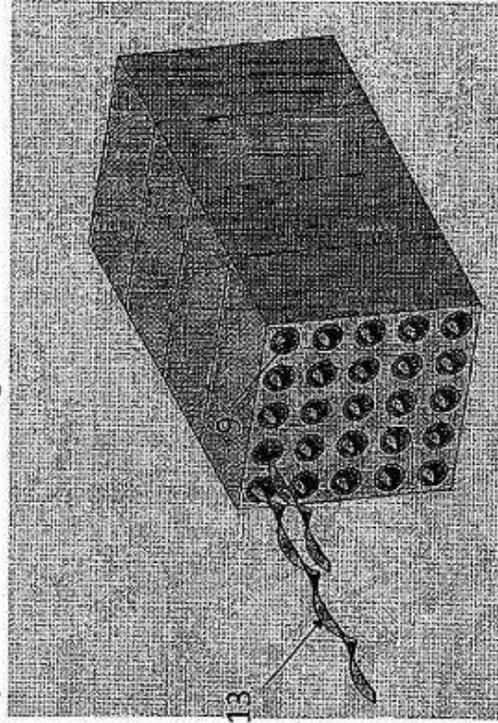
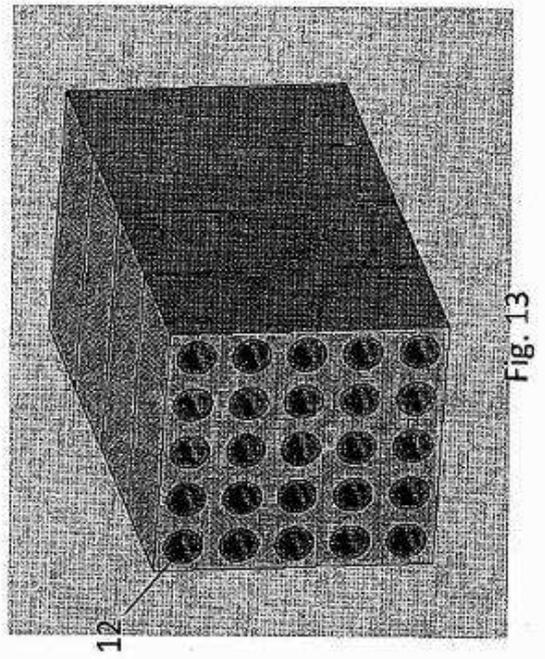
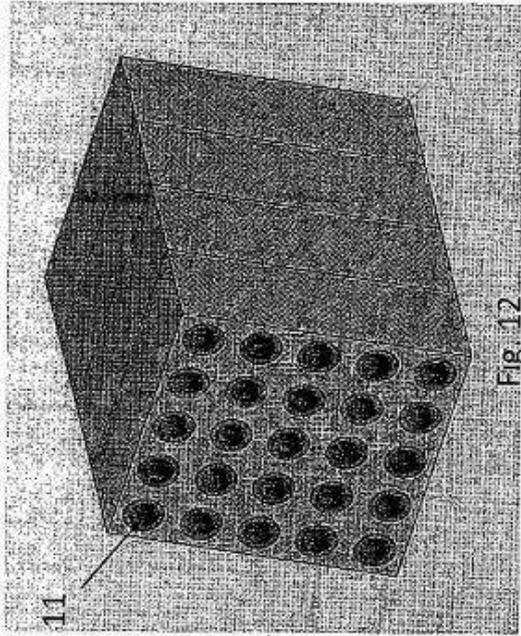


Fig. 11



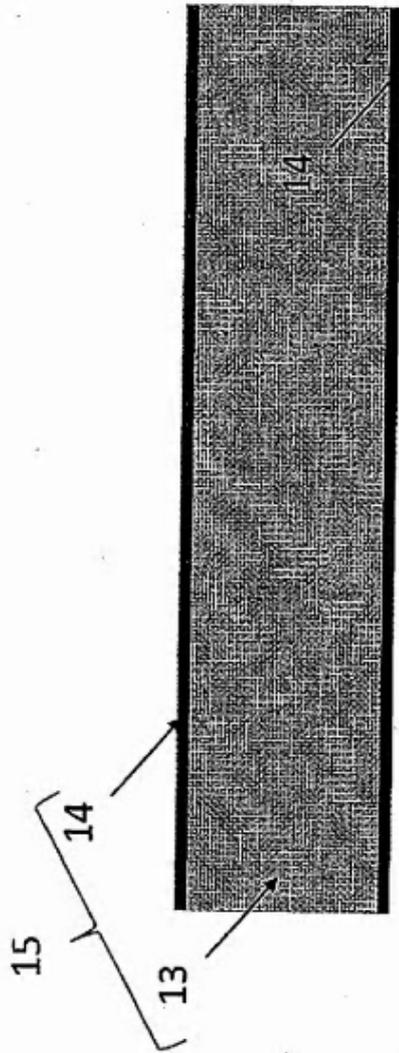


Fig. 14

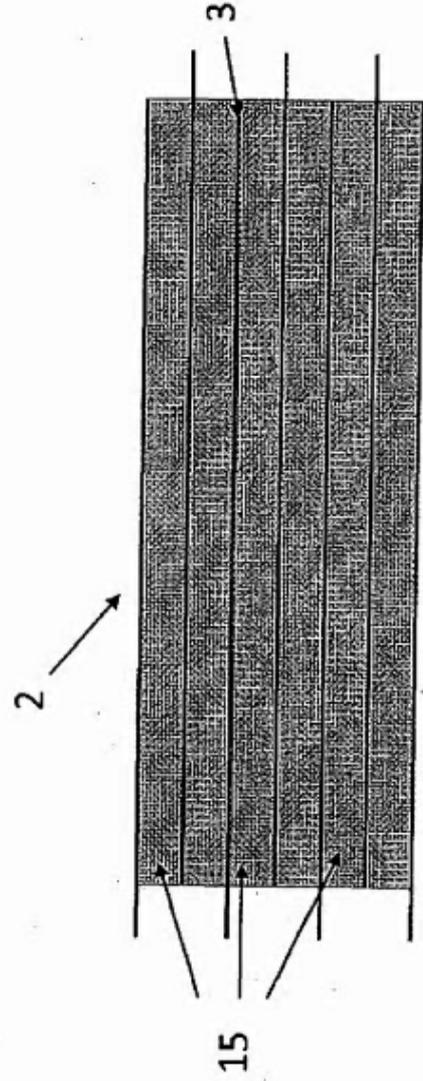


Fig. 15

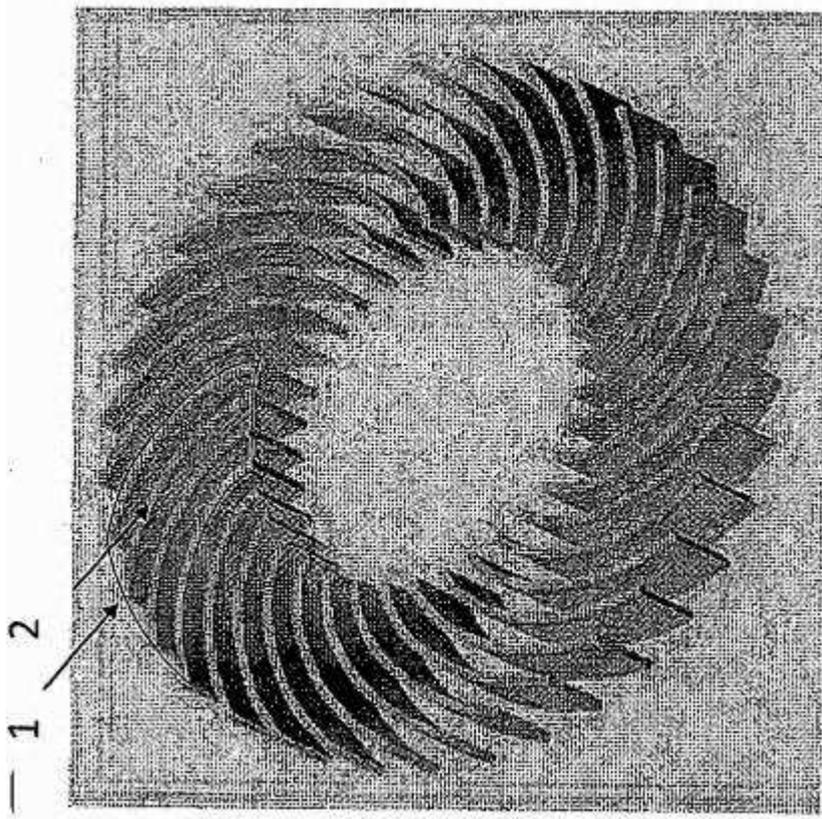


Fig. 16

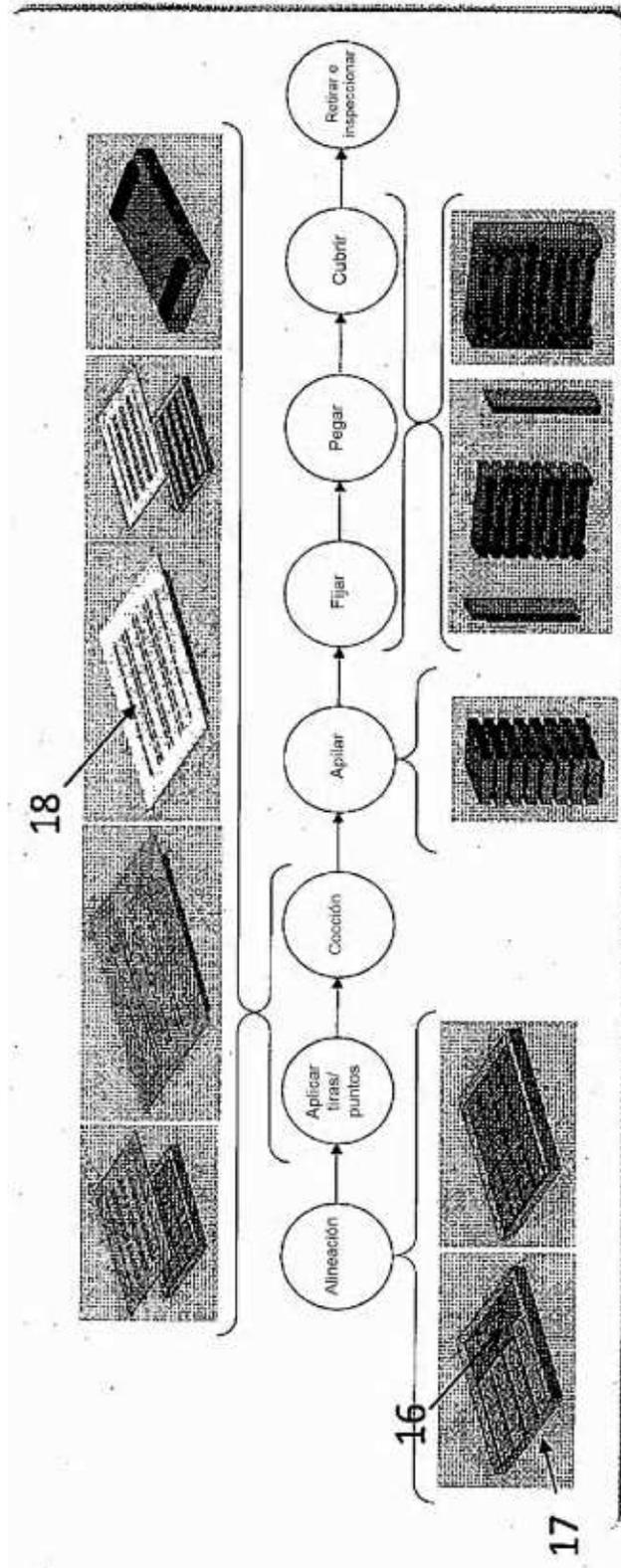


Fig. 17