

DESCRIPCIÓN

Caldera solar

Referencia cruzada con solicitudes relacionadas

5 La presente solicitud es, en parte, una continuación de la solicitud de patente US N° 13/007.262, presentada el 14 de Enero de 2011, que es, en parte, una continuación de cada una de la solicitud de patente US N° 12/620.109 presentada 17 de noviembre de 2009 y la solicitud de patente US N° 12/547.650 presentada el 26 de Agosto de 2009. Esta solicitud es también, en parte, una continuación de la solicitud de patente US N° 12/552.724, presentada el 2 de Septiembre de 2009.

10 Cada una de dichas solicitudes de patente US N° 12/547.650, 12/552.724 y 12/620.109 reivindican prioridad sobre la solicitud provisional US N° 61/151.984, presentada el 12 de Febrero de 2009, sobre la solicitud provisional US N° 61/152.011, presentada el 12 de Febrero de 2009, sobre la solicitud provisional US N° 61/152.035, presentada el 12 de Febrero de 2009, sobre la solicitud provisional US N° 61/152.049, presentada el 12 de
15 Febrero de 2009, sobre la solicitud provisional US N° 61/152.077, presentada el 12 de Febrero de 2009, sobre la solicitud provisional US N° 61/152.114, presentada el 12 de Febrero de 2009, y sobre la solicitud provisional US N° 61/152.286, presentada el 13 de Febrero de 2009. Cada una de las solicitudes de patente anteriores se incorpora en su totalidad, por referencia, a la presente memoria.

20 **Antecedentes de la invención**

1. Campo de la invención

La presente invención se refiere a la producción de energía solar y, más particularmente, a calderas solares y paneles receptores solares para calderas solares.

2. Descripción de la técnica relacionada

25 La generación de energía solar ha sido considerada como una fuente viable para ayudar a satisfacer las necesidades energéticas en un momento de creciente conciencia de los aspectos ambientales de la producción de energía. La producción de energía solar se basa, principalmente, en la capacidad de recoger y convertir la energía libremente disponible procedente del sol y puede ser producida con muy poco impacto sobre el medio ambiente.

30 La energía solar puede ser utilizada sin crear residuos radiactivos, como en la producción de energía nuclear, y sin producir emisiones contaminantes, incluyendo gases de efecto

invernadero como en la producción de energía usando combustibles fósiles. La producción de energía solar es independiente de los costes fluctuantes del combustible y no consume recursos no renovables.

5 Generalmente, los generadores de energía solar emplean campos de espejos controlados, llamados heliostatos, para recoger y concentrar la luz solar sobre un receptor para proporcionar una fuente de calor para la producción de energía. Típicamente, un receptor solar adopta la forma de un panel de tubos que transportan un fluido de trabajo a través del mismo. Los generadores solares anteriores han usado fluidos de trabajo tales como sal fundida, ya que esta tiene la capacidad de almacenar energía, lo que permite la generación
10 de energía cuando no hay radiación solar. Típicamente, los fluidos de trabajo calentados son transportados a un intercambiador de calor donde liberan calor en un segundo fluido de trabajo, tal como aire, agua o vapor de agua. La energía es generada haciendo pasar el aire caliente o vapor a través de una turbina que acciona un generador eléctrico.

Más recientemente, se ha determinado que la producción de energía solar puede
15 aumentarse y simplificarse mediante el uso de agua/vapor de agua como el único fluido de trabajo en un receptor que es una caldera. Esto puede eliminar la necesidad de un intercambiador de calor ineficiente entre dos fluidos de trabajo diferentes. Este desarrollo ha conducido a nuevos desafíos en la manipulación del calor solar intenso sin dañar el sistema. En una caldera solar, las tasas de transferencia de calor pueden alcanzar niveles de
20 aproximadamente 2-3 veces la tasa de transferencia de calor de una caldera típica alimentada con combustibles fósiles. Esta alta tasa de transferencia de calor intensifica los problemas relacionados con el mantenimiento de un calentamiento uniforme y una distribución del flujo a lo largo de los diseños conocidos de paneles de caldera. La alta tasa de transferencia de calor da lugar a altas presiones y temperaturas en los tubos de la
25 caldera y estructuras relacionadas. Además, en las calderas solares, sólo se calienta un lado de cada tubo de caldera, mientras que el lado opuesto está a la sombra, lo que da lugar a tensiones relacionadas con gradientes en la expansión/contracción térmica. Además, debido a que el sol sale y se pone cada día, las calderas solares deben experimentar un ciclo diario de expansión/contracción térmica, lo que puede conducir a un
30 aumento de los daños por fluencia y por fatiga debidos a las tensiones originadas por los ciclos.

En las calderas típicas, por ejemplo calderas de carbón, las superficies de transferencia de calor, concretamente, el supercalentador, recalentador y evaporador, están separados con

respecto a la ubicación física, así como con respecto al modo de transferencia de calor, por ejemplo, convección frente a radiación dominante. La separación de las superficies de transferencia de calor es importante ya que cada sección diferente contiene fluido con propiedades físicas diferentes, incluyendo la temperatura, la presión y la calidad. Esta separación permite que las diferentes superficies de transferencia de calor sean soportadas de manera individual y permite diferentes tasas de expansión térmica en cada una de las diferentes superficies de transferencia de calor. Por ejemplo, la sección de evaporación en una caldera típica adopta la forma de un cuadrilátero, con soportes rígidos sobre la línea central de cada pared y soldaduras fijas en cada esquina. Esto es posible porque cada lado de la caldera se expandirá a una tasa constante e igual, ya que cada lado tiene las mismas condiciones de vapor y experimenta un flujo de calor similar. Cuando la caldera se calienta y se expande, la sección de evaporación, con forma de cuadrilátero, se expande sin añadir tensión adicional sobre los paneles de evaporación.

En contraste, frecuentemente, las calderas solares tienen superficies de transferencia de calor que son integrales, contiguas o están apiladas una encima de la otra, lo que significa que las superficies de transferencia de calor se encuentran muy cerca, unas de las otras. Además, cada superficie de transferencia de calor individual puede tener entradas de flujo de calor, temperaturas de vapor y temperaturas de metal extremadamente diferentes, debido a la distribución no homogénea de la energía solar. Si se usa un procedimiento tradicional de soporte para los paneles, tal como en calderas de carbón tradicionales, por ejemplo, la gran variación en la expansión térmica causaría que los paneles se separaran.

Mientras los sistemas conocidos de producción de energía solar han sido considerados generalmente satisfactorios para sus propósitos previstos, sigue existiendo una necesidad en la técnica de calderas solares y paneles de calderas solares que puedan acomodar mejor el calor y la tensión relacionada con la producción de energía solar. También sigue existiendo una necesidad en la técnica de dichas calderas solares y paneles de calderas solares que sean fáciles de fabricar y usar. La presente invención proporciona una solución a estos problemas.

Sumario de la invención

La presente invención está dirigida a paneles modulares nuevos y útiles para calderas solares. Según una realización ejemplar, el panel incluye un colector de entrada, un colector de salida y una pluralidad de tubos que conectan, de manera fluida, el colector de entrada al colector de salida. Los tubos son sustancialmente coplanares, unos con los otros, formando

una superficie receptora solar y una superficie interna opuesta.

En ciertas realizaciones, cada tubo tiene un diámetro exterior en un intervalo que incluye aproximadamente 5,08 cm (2 pulgadas) y valores inferiores. Cada tubo puede tener un diámetro exterior en un intervalo que incluye aproximadamente 3,81 cm (1,5 pulgadas) y valores inferiores, aproximadamente 2,54 cm (1 pulgada) y valores inferiores, o aproximadamente 1,27 cm (0,5 pulgadas).

Según ciertas realizaciones, los tubos tienen una caída de presión en un intervalo que incluye de aproximadamente 1,34 kg/cm² a aproximadamente 19,34 kg/cm² (de aproximadamente 19 psi a aproximadamente 275 psi). Los tubos pueden tener una caída de presión en un intervalo que incluye de aproximadamente 1,76 kg/cm² a aproximadamente 5,27 kg/cm² (de aproximadamente 25 psi a aproximadamente 75 psi). Cada uno de los tubos puede tener un espesor, desde su diámetro interior a su diámetro exterior, comprendido en un intervalo de aproximadamente 3,429 mm (0,135 pulgadas) a aproximadamente 5,588 mm (0,220 pulgadas). El número de tubos del panel puede estar comprendido en un intervalo de aproximadamente 50 a aproximadamente 200, o de aproximadamente 100 a aproximadamente 150.

La invención proporciona también una caldera solar. La caldera solar incluye una pluralidad de paneles modulares tal como se ha descrito anteriormente, en los que los tubos tienen una conductividad térmica en un intervalo de aproximadamente 5,78 W/(m.K) y valores superiores, que puede ser de aproximadamente 8,67 W/(m.K) o valores superiores. En ciertas realizaciones, los tubos incluyen una aleación T91. Los tubos pueden incluir cualquier otra aleación o aleaciones adecuadas, por ejemplo, 178C, 192, 210A1, 210C, T1, T2, T11, T12, T22, T9, 304H, 310H, 316H, 321H y/o 347H. Los colectores pueden incluir cualquier tipo adecuado de acero u otro material adecuado. También se contempla que el calentador solar pueda incluir un tambor para distribuir vapor de una parte generadora de vapor de los paneles modulares a una parte supercalentadora de los paneles modulares, y tubos que conectan, de manera fluida, el tambor al generador de vapor y las partes supercalentadoras de los paneles modulares.

La invención incluye también una caldera solar, que incluye un generador de vapor que tiene una pluralidad de paneles generadores de vapor y un supercalentador que tiene una pluralidad de paneles supercalentadores, estando los paneles en comunicación de fluido con un circuito de fluido de la caldera. Cada uno de entre el generador de vapor y los paneles supercalentadores es un panel modular separado, tal como se ha descrito

anteriormente. Los tubos de los paneles supercalentadores tienen un diámetro menor que los tubos de los paneles generadores de vapor. Según ciertas realizaciones, el supercalentador tiene una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente 14,06 kg/cm² (200 psi) y valores inferiores. También se contempla que el supercalentador pueda estar configurado para tener una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente 19,34 kg/cm² (275 psi) y valores inferiores, aproximadamente 12,31 kg/cm² (175 psi) y valores inferiores, aproximadamente 10,55 kg/cm² (150 psi) y valores inferiores, aproximadamente 8,79 kg/cm² (125 psi) y valores inferiores, aproximadamente 7,03 kg/cm² (100 psi) y valores inferiores, o aproximadamente 3,52 kg/cm² (50 psi) y valores inferiores.

Estas y otras características de los sistemas y procedimientos de la presente invención serán más evidentes para las personas con conocimientos en la materia a partir de la descripción detallada siguiente de las realizaciones preferidas, junto con los dibujos.

Breve descripción de los dibujos

Con el propósito de que las personas con conocimientos en la materia a la que pertenece la presente invención comprendan fácilmente cómo fabricar y usar los dispositivos y procedimientos de la presente invención sin experimentación indebida, a continuación, las realizaciones preferidas de la misma se describirán detalladamente con referencia a ciertas figuras, en las que:

La Fig. 1 es una vista en alzado lateral de una realización ejemplar de un panel modular de caldera solar construido según la presente invención, que muestra los colectores de entrada y salida, con la superficie receptora solar de un panel contiguo cubriendo el colector de entrada;

La Fig. 2 es una vista en alzado lateral de partes de colector de realizaciones ejemplares de generador de los paneles generador de vapor, supercalentador y recalentador, verticalmente contiguos, contruidos según la presente invención, que muestra la separación vertical para acomodar la expansión y la contracción térmica de los paneles;

La Fig. 3 es una vista en perspectiva de una parte del panel modular de caldera solar de la Fig. 1, que muestra el colector y los colectores de los paneles contiguos dispuestos para acomodar la expansión y contracción térmica en los paneles;

La Fig. 4 es una vista en alzado interior de una pluralidad de paneles de la Fig. 1, que muestra los paneles cuando se montan en una caldera solar para formar una pared de la

misma, con los paneles dispuestos lado a lado con una separación para acomodar la expansión y contracción térmica en la dirección horizontal;

La Fig. 5 es una vista en planta de la caldera solar de la Fig. 4, que muestra cuatro paredes de caldera que rodean un espacio interior de la caldera; y

- 5 La Fig. 6 es una vista en despiece ordenado, en sección transversal, esquemática, de un tubo de caldera ejemplar construido según la presente invención, que muestra esquemáticamente la tensión circunferencial.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Ahora, se hará referencia a los dibujos, en los que los números de referencia similares
10 identifican aspectos o características estructurales similares de la presente invención. Para propósitos explicativos e ilustrativos, y no limitativos, en la Fig. 1 se muestra una vista parcial de una realización ejemplar de un panel modular de caldera solar según la invención y se designa, en general, mediante el carácter de referencia 100. Otras realizaciones de calderas solares según la invención, o aspectos de las mismas, se proporcionan en las Figs.
15 2-6, tal como se describirá. Los sistemas y procedimientos de la invención pueden ser usados para acomodar mejor y/o reducir las tensiones inducidas térmicamente en los paneles de la caldera solar.

Según la presente invención, las superficies de transferencia o receptoras de calor de las calderas solares se dividen en segmentos más pequeños como paneles receptores
20 modulares, que pueden expandirse y contraerse de manera independiente, aliviando las tensiones inducidas térmicamente y aliviando, de esta manera, los problemas en las tuberías de calderas solares tradicionales, descritos anteriormente. Con referencia ahora a la Fig. 1, en la misma se muestran las características de una caldera 100 solar construida según la presente invención. La caldera 100 para un receptor solar incluye un primer panel
25 102 de caldera (el panel inferior en la Fig. 1, que sólo se muestra parcialmente) que tiene una pluralidad de tubos sustancialmente coplanares que conectan, de manera fluida, un colector 113 de entrada del primer panel de colector (no mostrado en la Fig. 1, pero véase la Fig. 2) a un colector 104 de salida del primer panel 102 de caldera. Los tubos del primer panel 102 de caldera forman una primera superficie 106 receptora solar y una primera
30 superficie 108 interior, opuesta a la primera superficie 106 receptora solar. La superficie 106 receptora exterior recibe energía solar, por ejemplo, desde un campo de heliostatos, tal como se indica mediante las flechas en la Fig. 1. Las personas con conocimientos en la materia apreciarán fácilmente que el hecho de que los tubos sean coplanares es ventajoso

para calentar cada tubo de manera uniforme, pero pueden usarse también disposiciones no coplanares sin apartarse del espíritu y el alcance de la invención.

Un segundo panel 110 de caldera (el panel superior mostrado en la Fig. 1) incluye, de manera similar, una pluralidad de tubos que conectan, de manera fluida, un colector 112 de entrada del panel 110 a un colector 114 de salida del panel 110. Los tubos del panel 110 forman una segunda superficie 116 receptora solar y una segunda superficie 118 interior, opuesta a la segunda superficie 116 receptora solar, (es decir, las superficies exteriores e interiores, tal como se indica en la Fig. 1). Como la superficie 106 del receptor, la superficie 116 receptora exterior recibe la energía solar, por ejemplo, desde un campo de heliostatos, tal como se indica mediante las flechas en la Fig. 2.

El primer panel 102 y el segundo panel 110 de la caldera están contiguos a una parte 120 extremo superior del panel 102 y la parte extremo correspondiente de la superficie 106 superpuesta a un extremo 122 inferior del panel 110 para reducir o prevenir que la radiación solar pase entre la primera superficie 106 y la segunda superficie 116 del receptor solar al espacio interior de la caldera 100. Las superficies 108 y 118 interiores tienen una capa de material 124 aislante para proteger el espacio interior de la caldera 100 y los componentes en su interior de las altas temperaturas en la parte posterior de los tubos.

Tal como se indica mediante las flechas en la Fig. 1, la región de solapamiento entre los paneles 102 y 110 permite la expansión y contracción térmica de los paneles. Hay un hueco 121 entre la parte 120 extrema del panel 102 y la parte 122 extrema del panel 110. Tal como puede verse en la Fig. 1, el hueco 121 es laberíntico y, de esta manera, cualquier fuga de radiación solar es absorbida por los tubos de la caldera, por ejemplo, en una parte 122 extrema, y no se permite que penetre en el espacio interior de la caldera 100. Debido a que el extremo 120 del panel 102 y el extremo 122 del panel 110 están separados uno del otro, los paneles 102 y 110 pueden moverse, uno con relación al otro, durante la expansión y contracción térmica resultante, por ejemplo, del ciclo diario de radiación solar incidente sobre el área de recepción de la caldera 100. De esta manera, aunque el hueco 121 acomoda la expansión y contracción térmica, en términos de fuga de la radiación solar no existe prácticamente ningún hueco entre los paneles 102 y 110.

Con referencia ahora a la Fig. 2, el panel 102 es un panel generador de vapor y el panel 110 es un panel supercalentador. La caldera 100 incluye también paneles 140 recalentadores. Cada panel 140 recalentador incluye una pluralidad de tubos que conectan, de manera fluida, un colector 117 de entrada a un colector 115 de salida, de manera similar a la

descrita anteriormente con respecto a los paneles 102 y 110. El panel 140 se superpone al panel 102 de la misma manera que el panel 102 se superpone al panel 110, tal como se ha descrito anteriormente. Debe entenderse que la caldera 100 incluye múltiples paneles paralelos de cada tipo, tal como se indica en las Figs. 3-5. Múltiples conjuntos de paneles 102, 110 y 140 solapados pueden estar dispuestos cerca, unos de los otros, para formar una pared de la caldera, tal como se muestra en la Fig. 4. Tal como se muestra en la Fig. 5, pueden unirse múltiples paredes de caldera, por ejemplo, para formar una caldera de cuatro lados o de múltiples lados capaz de recibir energía solar concentrada desde los heliostatos que rodean la base de la caldera. Aunque se describe en la presente memoria en el contexto de una caldera de tres etapas, las personas con conocimientos en la materia apreciarán fácilmente que pueden usarse cualquier número adecuado de etapas, y pueden ser dispuestas en cualquier manera adecuada sin apartarse del espíritu y el alcance de la invención.

Anteriormente se han descrito las Figs. 1 y 2 en las que se muestra cómo los paneles 102, 110 de caldera acomodan la expansión y contracción térmica en la dirección vertical. Con referencia ahora a la Fig. 3, los paneles 102, 110 de la caldera están configurados también para acomodar la expansión y contracción térmica en la dirección horizontal debido a su configuración modular. La configuración modular de los paneles 102, 110 les proporciona una anchura relativamente pequeña con respecto a toda la caldera 100 solar. Hay dos o tres tubos 191 extremos en cada extremo de los colectores 112 y 104. Los tubos 191 extremos se doblan hacia el interior para reducir la longitud total de los colectores 112 y 104 respectivos, y lo mismo se aplica a los colectores 113, 114, 115 y 117, que no se muestran en la Fig. 3, pero véase la Fig. 2. La Fig. 4 muestra un conjunto de paneles 102 de caldera, en el que ocho paneles 102 de caldera son colocados cerca, unos de otros, como cuando se forma la parte supercalentador de una pared de la caldera solar. La Fig. 5 muestra cuatro de dichas paredes desde arriba, con las cuatro paredes rodeando un espacio interior de la caldera. Cada una de las Figs. 3-5 muestra huecos 103 verticales entre los paneles 102, lo que permite que los paneles 102 individuales de la caldera se expandan y se contraigan de manera independiente con respecto a los paneles vecinos. Es ventajoso que los huecos 103 se cierren completamente o casi completamente conforme los paneles 102 se expanden durante el funcionamiento, con el fin de hacer el mejor uso de la radiación solar suministrada al área de recepción, y para proteger el espacio interior de la caldera, tal como se ha descrito anteriormente.

Tal como se indica en la Fig. 3, cada panel 102 de la caldera incluye 52 tubos. Sin embargo,

se contempla que pueda usarse cualquier número adecuado de tubos para una aplicación determinada sin apartarse del espíritu y el alcance de la invención. Por ejemplo, el número de tubos del panel puede variar en un intervalo de 50 a 200, o para un panel de supercalentador, por ejemplo, en un intervalo de 100 a 150. El uso de tamaños de tubo más pequeños permite un mayor número de tubos en un panel de una anchura determinada, y/o permite anchuras de panel más pequeñas con un número determinado de tubos. El tamaño de los tubos se describe más detalladamente a continuación.

Un número limitado de tubos permite una anchura de celda limitada. Además, utilizando múltiples pasadas, y acomodando la expansión/contracción térmica en la dirección vertical, tal como se ha descrito anteriormente, los paneles pueden tener una altura limitada. Las configuraciones de calderas solares con múltiples pasadas se describen más detalladamente en la solicitud de patente US N° 13/007.262, de titularidad compartida, tramitada junto con la presente, presentada el 14 de Enero de 2011, que se incorpora por referencia, a la presente memoria, en su totalidad. La limitación de la altura y la anchura de los paneles es clave para fabricar los paneles modulares y para conseguir las ventajas descritas en la presente memoria. Por ejemplo, si la anchura del panel es inferior a 233,68 cm (7 pies, 8 pulgadas), es posible enviar estos paneles en un contenedor de transporte estándar que tiene una anchura interior de 233,68 cm (7 pies, 8 pulgadas).

Los flujos de calor particularmente altos y las características de calentamiento de la producción de energía solar, y los altos valores de tensión generados, junto con el hecho de que la caldera realiza un ciclo diariamente, presentan un reto único en el diseño del tubo de transferencia de calor. Los materiales y la configuración descritos en la presente memoria son capaces de reducir la cantidad de tensión presente dentro de un tubo determinado, mientras se minimiza también el efecto de la fluencia y los daños debidos a la fluencia/fatiga. Los tubos de la caldera 100 utilizan materiales específicos que son resistentes a la fluencia y a daños debidos a la fluencia/fatiga, tales como aceros al cromo-molibdeno. Los materiales ejemplares resistentes a la fluencia para esta aplicación incluyen aleaciones de cromo-molibdeno, tales como T11, T12, T22, T9 y T91, así como aleaciones de acero inoxidable austenítico, tales como 304H, 310H, 316H, 321H y 347H.

Otro factor importante en la reducción de las tensiones inducidas térmicamente en los tubos y otros componentes de la caldera 100 es la utilización de materiales que tienen una alta conductividad térmica. La opinión general respecto a la selección del material del tubo de la caldera dicta que en un diseño típico de caldera (por ejemplo, las plantas de combustibles

fósiles), materiales de los tubos se seleccionan únicamente en base a su resistencia. Sin embargo, se ha determinado según la presente invención que, debido al alto flujo de calor de la aplicación de caldera solar, una consideración especial en la selección del material del tubo es ventajosa no sólo teniendo en cuenta la resistencia del material, sino teniendo en cuenta también la conductividad térmica del material. La conductividad térmica, que puede expresarse en $W/(m.K)$, donde $1 W/(m.K) = 0,578 BTU/(hr.ft.F)$, es la propiedad de un material que indica su capacidad para conducir el calor. Cuanto mayor sea la conductividad térmica, mayor será la tasa de flujo de calor a través del material. En una caldera solar, el flujo de calor se aplica sólo a la parte del tubo expuesta a la radiación solar concentrada, es decir, la superficie orientada hacia el exterior. La parte sombreada del tubo, es decir, la superficie orientada hacia el interior, no recibe ninguna radiación solar intensa. Esto crea una tendencia a que los tubos estén calientes en el lado expuesto y relativamente fríos en el interior. Este gran gradiente térmico resulta en un estrés inducido térmicamente dentro de los tubos, ya que la expansión térmica es una función de la temperatura. Un aumento de la conductividad térmica permite que el tubo conduzca más fácilmente el calor desde el lado expuesto al lado frío, ayudando incluso a homogeneizar el gradiente térmico a través del tubo y reduciendo, de esta manera, las tensiones inducidas térmicamente.

Se consigue un equilibrio ventajoso entre la resistencia y la conductividad térmica, según la invención. Esto contradice la opinión general en la técnica, en la que el material del tubo se selecciona según el criterio de que el más resistente es el mejor ya que, en general, los materiales más resistentes tienen conductividades térmicas inferiores. Debido a que el calor debe ser conducido a través de la pared del tubo, es ventajoso seleccionar un material de tubo que tenga una conductividad térmica relativamente alta (es decir, una baja resistencia térmica). Esto es especialmente cierto para el supercalentador y el recalentador que tienen un coeficiente de transferencia de calor interior relativamente bajo en comparación con el generador de vapor. Se ha determinado, según la presente invención, que con el fin de transferir eficazmente el calor a través de la pared de un tubo, la conductividad térmica debería ser de al menos $5,78 W/(m.K)$, y preferiblemente de al menos $8,67 W/(m.K)$. Por lo tanto, los tubos en los paneles 102 tienen una conductividad térmica de aproximadamente $8,67 W/(m.K)$ o superior. Los materiales de tubo ejemplares con resistencia y conductividad térmica adecuadas para la presente aplicación incluyen aceros al cromo-molibdeno, tales como los indicados anteriormente, acero de bajo carbono (por ejemplo, 178C), acero de medio carbono (por ejemplo, 192, 210A1 y 210C), y acero de aleación de molibdeno y carbono (por ejemplo, T1 y T2), por ejemplo.

De manera ventajosa, los tubos de los paneles 102 tienen un bajo coeficiente de expansión térmica. Esto es beneficioso ya que la intensidad de la radiación solar incidente sobre los tubos durante el funcionamiento puede causar, potencialmente, grandes diferencias de temperatura en la estructura de los tubos. El bajo coeficiente de expansión térmica reduce la cantidad de expansión y contracción térmica que experimentan los tubos reduciendo, de esta manera, el estrés térmico, la fatiga y los efectos relacionados. Los materiales ejemplares con coeficientes de expansión térmica adecuadamente bajos incluyen acero de bajo carbono, acero de medio carbono, acero de aleación de molibdeno y carbono y acero al cromo-molibdeno, por ejemplo.

Los colectores pueden incluir un material tal como cualquier tipo de acero u otro material adecuado. La caldera 100 solar incluye un tambor para distribuir el vapor desde una parte generadora de vapor de los paneles modulares (por ejemplo, una pluralidad de paneles 102 como en la Fig. 2) a una parte supercalentadora de los paneles modulares (por ejemplo, una pluralidad de paneles 110 como en la Fig. 2), y tubos que conectan, de manera fluida, el tambor al generador de vapor y las partes supercalentadoras de los paneles modulares. Las configuraciones adecuadas de tambor y tubos se muestran y describen más detalladamente en la publicación de solicitud de patente US N° 2010-0199974, de titularidad compartida, tramitada junto con la presente, y la publicación de solicitud de patente US N° 2010-0199976, de titularidad compartida, tramitada junto con la presente, cada una de las cuales se incorpora en su totalidad a la presente memoria, por referencia.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones explicadas anteriormente, incluyendo las consideraciones que van en contra de la opinión general de la técnica, el supercalentador, el recalentador y los tubos generadores de vapor de la caldera 100 se fabrican en acero T91. El acero T91 es un material no convencional para los tubos de la caldera, debido, al menos en parte, a la disponibilidad de materiales que son más fáciles de trabajar, es decir, soldar, plegar, etc. Pero según la invención, el acero T91 proporciona una conductividad térmica ventajosa y alta resistencia. El acero T91 tiene un coeficiente de expansión térmica relativamente bajo en comparación con el acero inoxidable, por ejemplo, que sería un material seleccionado si se sigue la opinión aceptada en la técnica. Sin embargo, las personas con conocimientos en la materia apreciarán fácilmente que el acero T91 es ejemplar y que puede usarse cualquiera de los otros materiales descritos anteriormente, o cualquier otro material adecuado según las consideraciones anteriores, sin apartarse del espíritu y alcance de la invención.

Otra forma importante de reducir las tensiones inducidas térmicamente en los tubos de la caldera solar es usando diámetros de tubos y espesores de pared que responden mejor a los gradientes térmicos y las presiones implicadas. El uso de espesores de pared del tubo que son más delgados que en las calderas típicas, por ejemplo, las calderas de carbón, ayuda a distribuir el calor de manera más uniforme a través del tubo. Esto es debido al hecho de que hay menos masa para conducir el calor en los tubos con paredes más delgadas. Esto es importante, ya que en las aplicaciones de calderas solares toda la energía solar es enfocada en el diámetro exterior del tubo y debe ser conducida a través de la pared del tubo de metal al fluido de trabajo. Un tubo de pared más gruesa equivale a una mayor resistencia térmica y una peor transferencia de calor. La utilización de un tubo de pared delgada es ventajosa para enfriar el tubo y calentar el fluido de trabajo, de manera eficaz. Con el fin de mantener una resistencia suficiente para mantener las presiones y las temperaturas presentes en el interior de una caldera solar, sin embargo, debe mantenerse un espesor de pared mínimo del tubo.

Ahora, se hace referencia a la Fig. 6, que representa esquemáticamente la tensión circunferencial en un tubo 150 ejemplar de uno de los paneles (por ejemplo, los paneles 102, 110, 140 de la caldera). Una manera ventajosa de reducir el espesor de la pared es reduciendo el radio exterior (r) del propio tubo. Al reducir el radio exterior (r) del tubo, se reduce la tensión circunferencial (σ_h), indicada por las pequeñas flechas en el corte en sección transversal en la Fig. 6. La tensión circunferencial (σ_h) es causada por la fuerza de la presión (P) interna que empuja hacia el exterior sobre la superficie interior del tubo, tal como se indica por las flechas grandes en la Fig. 6. Debido a que la fuerza es el producto de la presión y el área, reduciendo el radio (r) del tubo se reduce la cantidad de área de superficie sobre la que puede actuar la presión (P) y, por lo tanto, se reduce la tensión circunferencial (σ_h) en el interior del tubo.

Unas tensiones circunferenciales (σ_h) más pequeñas significan que un tubo puede tener un espesor de pared más delgado (t) y todavía pueden acomodar la presión (P). El espesor (t) de tubo más pequeño significa también que cada tubo usa menos material. Debido a que hay menos material para que el calor sea conducido a través de un tubo más delgado, el calor es distribuido de manera más uniforme de lo que sería en tubos de paredes más gruesas. De esta manera, la reducción del diámetro del tubo reduce también los gradientes térmicos y las tensiones inducidas térmicamente.

El diámetro de tubo más pequeño es una ventaja en términos de estrés y factores térmicos;

sin embargo, las ventajas deben sopesarse con el hecho de que la caída de presión aumenta al disminuir el diámetro del tubo y, en particular, al disminuir el diámetro interior. Los tubos más pequeños, con áreas de flujo en sección transversal más pequeñas, crean caídas de presión más altas que los tubos de diámetro más grande. Debe conseguirse un equilibrio entre la caída de la presión y la tensión inducida térmicamente. Para equilibrar estas propiedades en conflicto, la caldera 100 usa un diámetro de tubo que se encuentra en el intervalo de 1,27 cm a 5,08 cm (de ½ pulgada a 2 pulgadas) de diámetro exterior, con un espesor de pared correspondiente suficientemente grande para mantener la resistencia requerida. Un intervalo adecuado para el espesor de la pared es de aproximadamente 3,429 mm a aproximadamente 5,588 mm (de aproximadamente 0,135 pulgadas a aproximadamente 0,220 pulgadas). Este intervalo de diámetros de tubo y espesores de pared del tubo proporciona condiciones ideales para la reducción del estrés, transferencia de calor y caída de presión. La caída de presión con estos tamaños de tubo se mantiene entre 3,52 y 19,34 kg/cm² (50 y 275 psi). El diámetro del tubo, el espesor y la correspondiente caída de presión pueden variarse de una aplicación a otra, dependiendo de elementos tales como las longitudes de tubería, el número de pasadas y similares. Por ejemplo, para un supercalentador con paneles tales como el panel 110, que tiene tubos con un diámetro exterior de 1,905 cm (0,75 pulgadas) y un espesor de pared de 3,429 mm (0,135 pulgadas), la caída de presión es de aproximadamente 8,79 kg/cm² (125 psi). Como otro ejemplo, para un supercalentador que tiene tubos con un diámetro exterior de 1,905 cm (0,75 pulgadas) y un espesor de pared de 3,81 mm (0,150 pulgadas), la caída de presión es de aproximadamente 12,31 kg/cm² (175 psi). En otro ejemplo, para un supercalentador que tiene tubos con un diámetro exterior de 1,905 cm (0,75 pulgadas) y un espesor de pared de 5,588 mm (0,220 pulgadas), la caída de presión es de aproximadamente 19,34 kg/cm² (275 psi). Estos ejemplos proporcionan una caída de presión en el supercalentador en su conjunto, basada en un sistema de supercalentador ejemplar que tiene longitudes de panel de 723,9 cm (23 pies, 9 pulgadas), cuatro pasadas, ocho paneles por pasada y tubos de interconexión.

La opinión aceptada en la técnica de las calderas dicta que deberían usarse tubos más grandes, típicamente mayores de 6,35 cm (2,5 pulgadas), en el supercalentador, el recalentador y el evaporador, específicamente para aumentar el área de flujo para reducir la caída de presión. Además, la opinión aceptada en la técnica dicta también que los tubos del supercalentador deberían tener un diámetro mayor que los tubos del generador de vapor debido a la menor densidad del vapor de agua a presiones sub-críticas. Por ejemplo, el

documento WO 2008/154599, publicado el 18 de Diciembre de 2008, indica que los tubos de generación de vapor deberían ser de 1,27 cm (0,5 pulgadas) de diámetro mientras que los tubos supercalentadores deberían ser de 2,54 cm (1,0 pulgada) de diámetro.

5 Contrariamente a la opinión aceptada en la técnica, según la presente invención, los tubos de los paneles 102 del generador de vapor, denominado a veces evaporador o paredes de agua, tienen un diámetro exterior en el intervalo de aproximadamente 2,54 cm a aproximadamente 3,81 cm (de aproximadamente 1,0 a aproximadamente 1,5 pulgadas), y los tubos de los paneles 110 del supercalentador tienen un diámetro menor que los tubos del evaporador, con un diámetro exterior de aproximadamente 2,54 cm (1,0 pulgada). Los
10 tubos de los paneles 140 del recalentador tienen un diámetro mayor que los tubos del evaporador, con un diámetro exterior mayor o igual a aproximadamente 3,81 cm (1,5 pulgadas). El flujo de calor típico para los paneles de la caldera solar es 2-3 veces mayor que el de una caldera convencional (combustibles fósiles). Según la invención, se ha determinado que la transferencia de calor, concretamente el calentamiento de los fluidos y
15 la refrigeración de los tubos, tiene prioridad sobre la reducción de la caída de presión. Los tubos del supercalentador, de diámetro reducido, aumentan el coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior de los tubos, lo que se traduce en una refrigeración adicional del tubo. La mayor capacidad de transferencia de calor permite una reducción general del tamaño de la caldera, lo que permite un nivel determinado de producción de
20 energía con un menor número de espejos heliostatos necesarios.

Los sistemas y procedimientos de la presente invención se describen en la presente memoria en el contexto ejemplar de una caldera solar sub-crítica. También se contempla que los sistemas y procedimientos de la invención puedan llevarse a la práctica en calderas supercríticas sin apartarse del espíritu y el alcance de la invención.

25 Los procedimientos y sistemas de la presente invención, tal como se ha descrito anteriormente y se ha mostrado en los dibujos, permiten calderas solares y paneles solares de caldera con propiedades superiores, incluyendo una mejor acomodación de las tensiones inducidas térmicamente, facilidad de construcción y mantenimiento, y una mejor distribución del calor. Un beneficio adicional de una construcción más pequeña o modular para los
30 paneles solares de la caldera es la facilidad de transporte y la facilidad de construcción de los sub-conjuntos. También permite un menor esfuerzo de construcción y una sustitución fácil de sólo ciertos paneles, o de todos los paneles, según sea necesario.

Aunque los aparatos y los procedimientos de la presente invención se han mostrado y

descrito con referencia a las realizaciones preferidas, las personas con conocimientos en la materia apreciarán fácilmente que pueden realizarse cambios y/o modificaciones a la misma sin apartarse del espíritu y el alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Una caldera solar comprende:

a) un generador de vapor que incluye una pluralidad de paneles generadores de vapor en comunicación de fluido con un circuito de fluido de la caldera; y

5 b) un supercalentador que incluye una pluralidad de paneles de supercalentador comunicados con el circuito de fluido, en el que cada uno de entre el generador de vapor y los paneles del supercalentador es un panel modular separado que incluye:

i) un colector de entrada:

ii) un colector de salida; y

10 iii) una pluralidad de tubos que conectan el colector de entrada al colector de salida, en el que los tubos son sustancialmente coplanares, unos con los otros, formando una superficie de receptor solar y una superficie interior opuesta, y en el que los tubos de los paneles del supercalentador tienen un diámetro más pequeño que los tubos de los paneles del generador de vapor.

15 2. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que cada tubo tiene un diámetro exterior en un intervalo que incluye aproximadamente 5,08 cm (2 pulgadas) y valores inferiores.

3. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que cada tubo tiene un diámetro exterior en un intervalo que incluye aproximadamente 3,81 cm (1,5 pulgadas) y valores inferiores.

20 4. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que cada tubo tiene un diámetro exterior en un intervalo que incluye aproximadamente 2,54 cm (1 pulgada) y valores inferiores.

5. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que el supercalentador tiene una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente $19,34 \text{ kg/cm}^2$ (275 psi) y valores inferiores.

25 6. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que el supercalentador tiene una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente $12,31 \text{ kg/cm}^2$ (175 psi) y valores inferiores.

7. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que el supercalentador tiene una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente $8,79 \text{ kg/cm}^2$ (125 psi) y valores inferiores.

8. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que el supercalentador tiene una caída de presión en un intervalo que incluye aproximadamente $3,52 \text{ kg/cm}^2$ (50 psi) y valores inferiores.
9. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que cada uno de los tubos tiene un espesor, desde su diámetro interior a su diámetro exterior, en un intervalo de aproximadamente 3,429 mm a aproximadamente 5,588 mm (de aproximadamente 0,135 pulgadas a aproximadamente 0,220 pulgadas).
10. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que el número de tubos está comprendido en un intervalo de 50 a 200.
11. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que los tubos tienen una conductividad térmica de aproximadamente $8,67 \text{ W/(m.K)}$.
12. Caldera solar de acuerdo a la reivindicación 1; comprendiendo un panel modular que comprende:
- a) un colector de entrada;
 - b) un colector de salida; y
 - c) una pluralidad de tubos que conectan el colector de entrada al colector de salida, en el que los tubos son sustancialmente coplanares, unos con los otros, formando una superficie de receptor solar y una superficie interna opuesta, y en el que los tubos incluyen material de aleación de acero T91.
13. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que el número de tubos está comprendido en un intervalo de 50 a 200.
14. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que el número de tubos está comprendido en un intervalo de 100 a 150.
15. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que cada tubo tiene un diámetro exterior menor de 5,08 cm (2 pulgadas).
16. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que los tubos tienen una conductividad térmica comprendida en un intervalo de aproximadamente $5,78 \text{ W/(m.K)}$ y valores superiores.
17. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que los tubos tienen una caída de presión comprendida en un intervalo que incluye de aproximadamente $1,34 \text{ kg/cm}^2$ (19 psi) a

aproximadamente 19,34 kg/cm² (275 psi).

18. Caldera solar según la reivindicación 12, en el que los tubos tienen una caída de presión comprendida en un intervalo que incluye de aproximadamente 1,76 kg/cm² (25 psi) a aproximadamente 5,25 kg/cm² (75 psi).

5 19. Caldera solar según la reivindicación 12 que comprende:

a) una pluralidad de paneles modulares, en el que cada panel incluye un colector de entrada, un colector de salida y una pluralidad de tubos que conectan el colector de entrada al colector de salida, en el que los tubos son sustancialmente coplanares, unos con los otros, formando una superficie de receptor solar y una superficie interna opuesta, y en el que los tubos tienen una conductividad térmica en un intervalo de
10 aproximadamente 5,78 W/(m.K) y valores superiores.

20. Caldera solar según la reivindicación 1, en la que los tubos incluyen un material seleccionado de entre el grupo de aleaciones que consiste en 178C, 192, 210A1, 210C, T1, T2, T11, T12, T22, T9, T91, 304H, 310H, 316H, 321H y 347H.

15

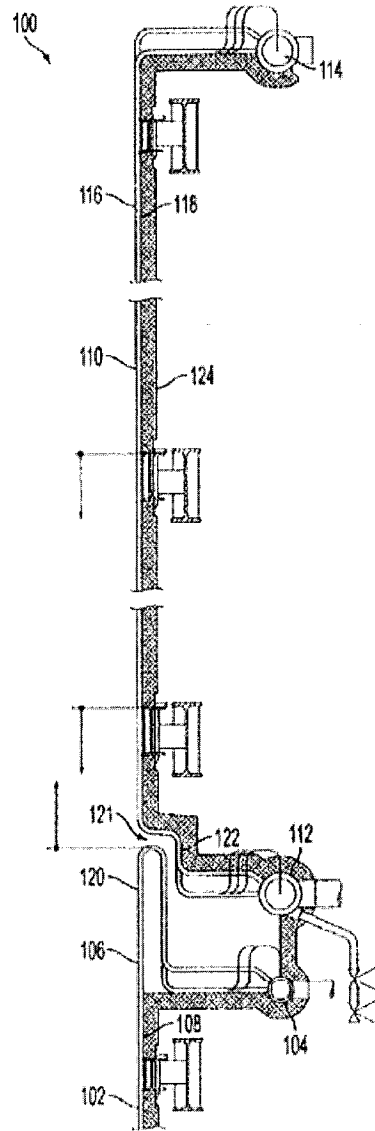


FIG. 1

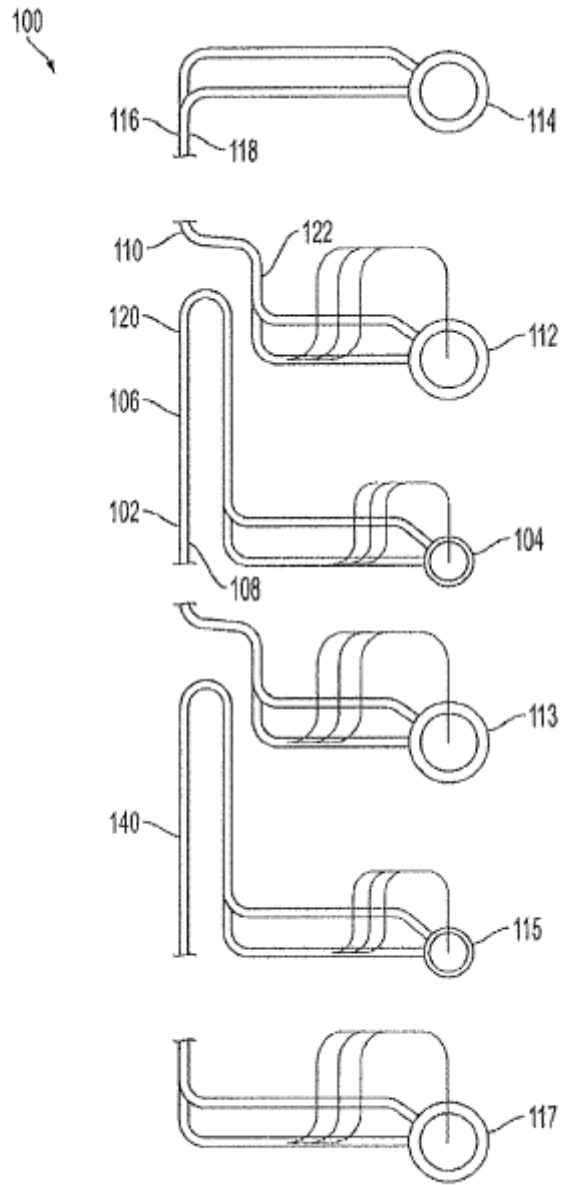


FIG. 2

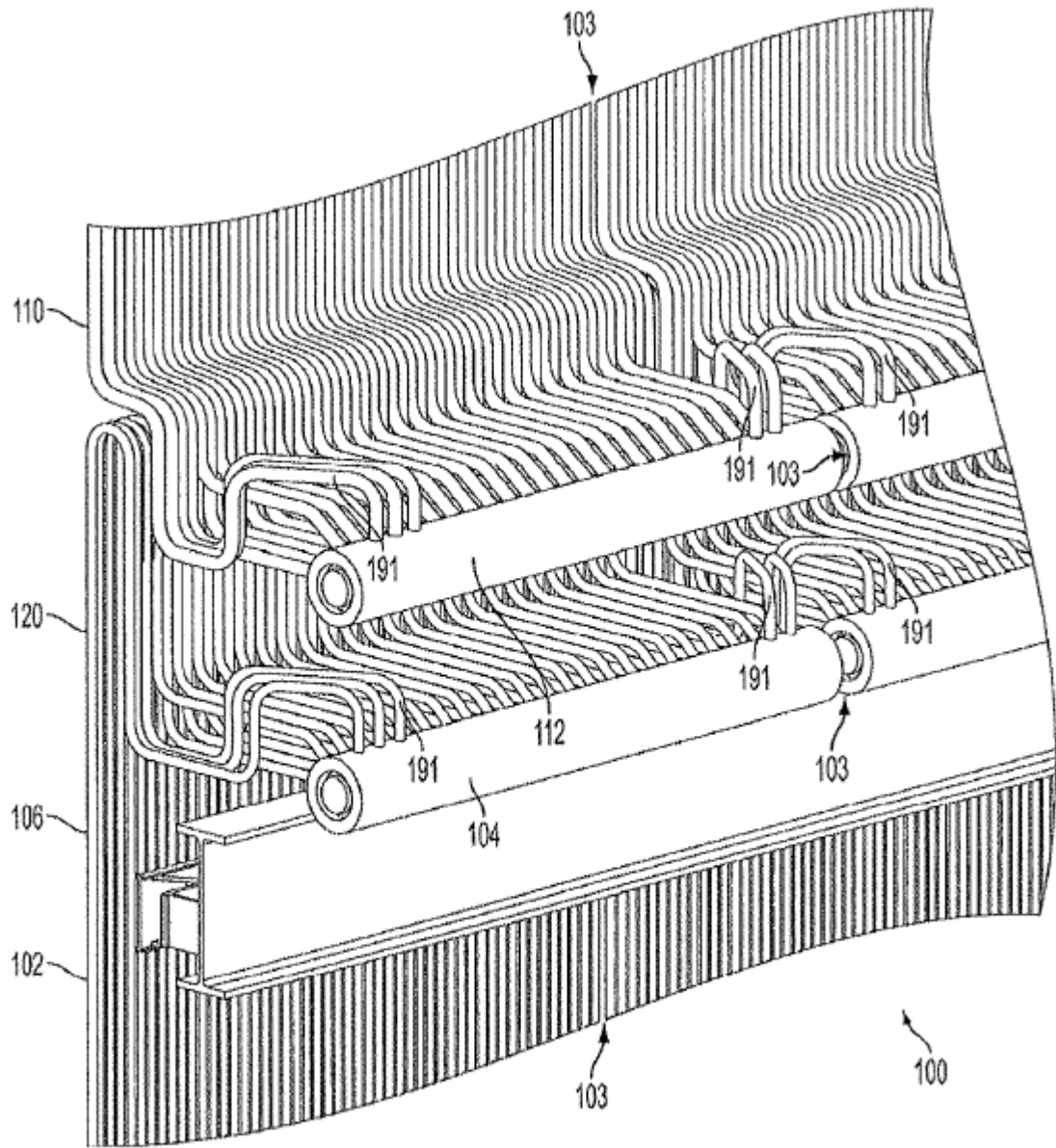


FIG. 3

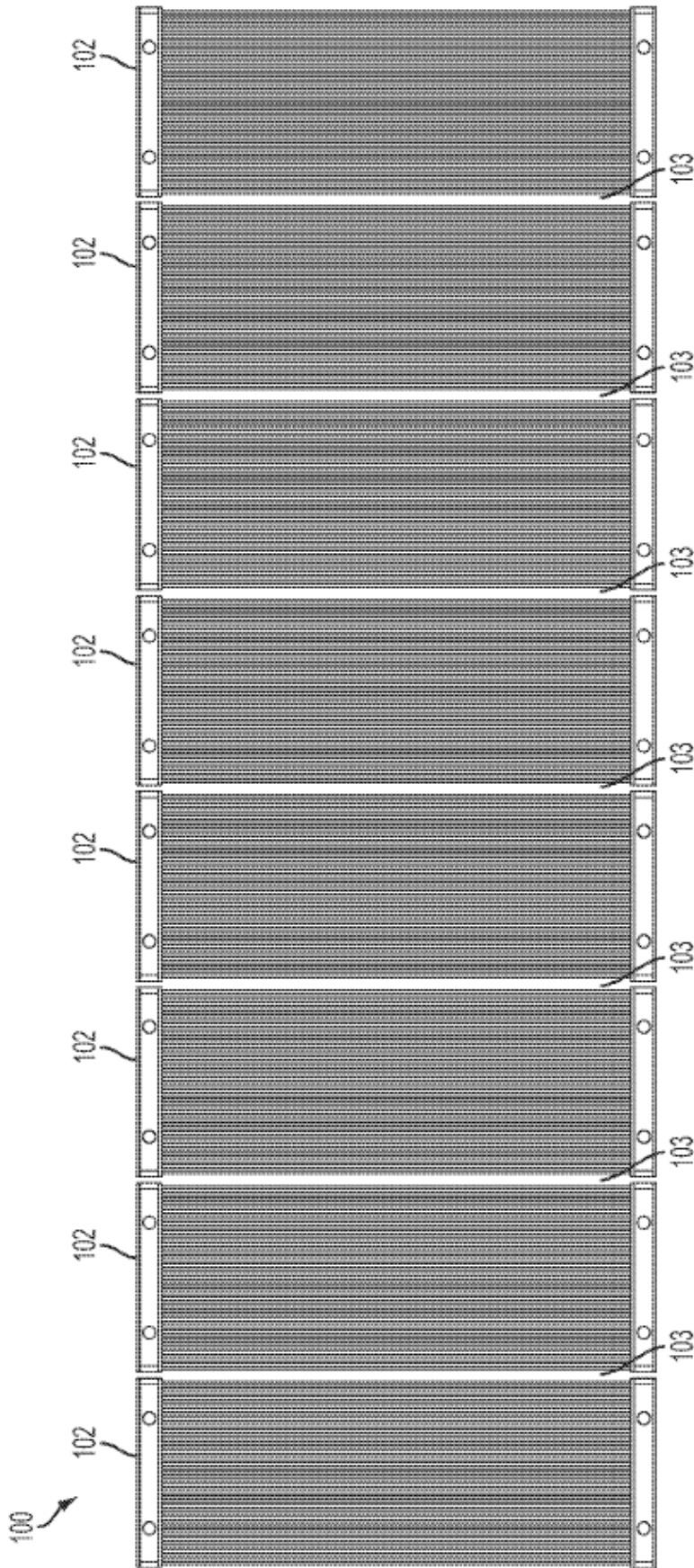


FIG. 4

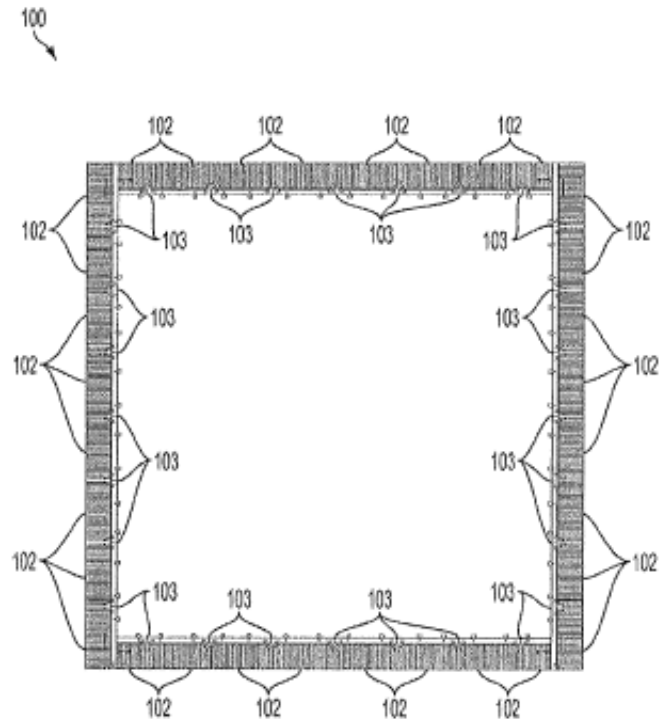


FIG. 5

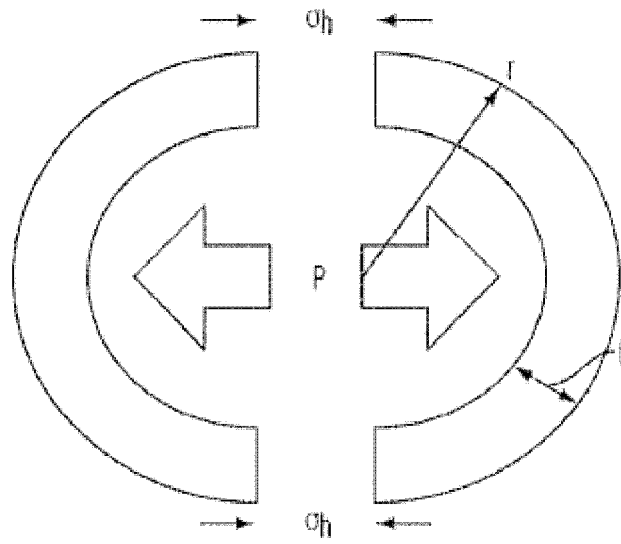


FIG. 6