

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 869 238**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)
B29C 70/44 (2006.01)
B29C 70/84 (2006.01)
B29C 70/86 (2006.01)
B29L 31/08 (2006.01)
B29D 99/00 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.12.2012 E 19156353 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.03.2021 EP 3505751**

54 Título: **Palas de turbina eólica**

30 Prioridad:

16.12.2011 GB 201121649
19.01.2012 US 201261588247 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
25.10.2021

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

HAHN, FRANK HOELGAARD;
PAYNE, CHRIS y
HANCOCK, MARK

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 869 238 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

Palas de turbina eólica

La presente invención se refiere a palas de rotor para turbinas eólicas y a métodos de fabricación de palas de turbina eólica.

5 En la figura 1 se ilustra una turbina eólica típica. La turbina eólica 1 comprende una torre 2, una góndola 3 montada en la parte superior de la torre 2 y un rotor 4 acoplado funcionalmente a un generador 5 dentro de la góndola 3. La turbina eólica 1 convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Además del generador 5, la góndola 3 aloja los diversos componentes requeridos para convertir la energía eólica en energía eléctrica y también los diversos componentes requeridos para hacer funcionar y optimizar el rendimiento de la turbina eólica 1. La torre 2
10 soporta la carga que suponen la góndola 3, el rotor 4 y otros componentes de la turbina eólica dentro de la góndola 3.

El rotor 4 incluye un buje central 6 y tres palas de rotor alargadas 7a, 7b, 7c de configuración aproximadamente plana que se extienden radialmente hacia fuera desde el buje central 6. En funcionamiento, las palas 7a, 7b, 7c están configuradas para interactuar con el flujo de aire en circulación para producir una sustentación que hace que
15 el buje central 6 rote alrededor de su eje longitudinal. Una velocidad del viento que supere un nivel mínimo activará el rotor 4 y permitirá que rote dentro de un plano sustancialmente perpendicular a la dirección del viento. La rotación se convierte en energía eléctrica mediante el generador 5, que se suministra habitualmente a la red eléctrica.

Una pala de rotor convencional está compuesta por una carcasa exterior y un larguero alargado hueco interior de sección transversal generalmente rectangular. El larguero sirve para transferir cargas desde la pala en rotación hasta el buje de la turbina eólica. Tales cargas incluyen cargas de tracción y de compresión dirigidas a lo largo de la longitud de la pala que surgen del movimiento circular de la pala y cargas que surgen del viento que se dirigen a lo largo del grosor de la pala, es decir, desde el lado de barlovento de la pala hasta el lado de sotavento.

Se conoce un tipo alternativo de pala de rotor que evita la necesidad de un larguero interior al incorporar dentro de la carcasa exterior una o más estructuras de refuerzo fibrosas de alta resistencia a la tracción que se extienden a lo largo de la dirección longitudinal de la pala. Se describen ejemplos de tales disposiciones en los documentos EP 1 520 983 y WO 2006/082479. También se describen otras disposiciones en los documentos US 2012/0014804 y WO 2011/088372.

En estas disposiciones, se hace uso de tiras de material fibrosas pultruidas. La pultrusión es un procedimiento continuo similar a la extrusión, en la que se arrastran fibras a través de resina líquida y luego se calientan en una cámara abierta donde se cura la resina. El material fibroso curado resultante tiene una sección transversal constante pero, dado que el procedimiento es continuo, el material una vez formado puede cortarse a cualquier longitud arbitraria. Un procedimiento de este tipo es particularmente barato y, por tanto, una opción atractiva para la fabricación de estructuras de refuerzo para palas de turbina eólica.

El uso de tiras pultruidas curadas supera problemas asociados con las disposiciones convencionales en las que se introducen fibras no curadas en un molde para formar las partes de una pala de turbina eólica, en las que existe el riesgo de que las fibras se desalineen.

Además, las tiras pultruidas tienen la propiedad de absorber los momentos de flexión muy elevados que se dan durante la rotación de las palas de turbina eólica.

En las dos disposiciones conocidas anteriores, se usa un número relativamente grande de elementos independientes para formar la estructura de refuerzo, y cada elemento debe situarse individualmente dentro de la estructura de la carcasa.

Sería deseable proporcionar una estructura de refuerzo adecuada para una pala de turbina eólica de este tipo alternativo que tenga una construcción más sencilla y, por tanto, sea más barata de fabricar.

El documento WO2009/059604 describe una esterilla estructural para reforzar una estructura de pala de turbina eólica y la esterilla puede formarse a partir de elementos pultruidos. El documento US 2009/0269392 describe una pala de turbina eólica que comprende elementos estructurales alargados formados a partir de paños de fibra laminados impregnados de resina.

Sin embargo, en esta disposición los paños de fibra se curan *in situ*, lo que requiere que los paños se sitúen cuidadosamente y se orienten correctamente en la superficie de la carcasa antes del moldeado.

50 Por tanto, sería deseable proporcionar una pala de turbina eólica que supere, o al menos mitigue, algunas o la totalidad de las desventajas anteriores de las palas de turbina eólica conocidas.

Por tanto, según un primer aspecto de la presente invención se proporciona una pala de turbina eólica según la reivindicación 1.

Dentro de la pala de turbina eólica la pila hace función de tapa de larguero. Preferiblemente, la anchura de cada pila se extiende dentro de la pala, en uso, en una dirección generalmente en el sentido de la cuerda dentro de un plano sustancialmente paralelo a la superficie de la pala. En una sección transversal orientada transversalmente hacia la dirección longitudinal de la pala, cada pila tiene la forma de un rectángulo oblongo, en la que el grosor de la pila es paralelo a los lados más cortos del rectángulo y la anchura del rectángulo es paralela a los lados más largos del rectángulo.

El alma es alargada en la dirección longitudinal de la pala. Se extiende en una dirección transversal entre al menos una de las estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y al menos una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa. Tal como se muestra a modo de ejemplo a continuación, la pala puede tener dos almas con forma de I o con forma de C, cada una de las cuales se extiende entre una de las estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa. En otras realizaciones, algunas de las cuales se describen a continuación, la pala tiene un alma con una sección transversal con forma de X, que se extiende entre dos estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y dos estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa.

Una importante ventaja técnica de proporcionar al menos dos estructuras de refuerzo de este tipo dentro de cada semicarcasa surge de la curvatura de la pala de turbina eólica. Con el fin de lograr la curvatura deseada, las superficies interiores de los moldes usados para fabricar las semicarcasas también son curvas, y esto impone una curvatura correspondiente a los revestimientos interior y exterior durante el procedimiento de moldeo. Dado que las superficies superior e inferior de las pilas son sustancialmente planas, esto da lugar a un hueco entre las superficies de las pilas y los revestimientos interior y exterior curvos, que se rellenará con resina durante el moldeo. Con el fin de optimizar la resistencia de la pala de turbina resultante, es deseable reducir el tamaño del hueco. Con la presente invención, esto se logra proporcionando al menos dos estructuras de refuerzo dentro de cada semicarcasa, de manera que cada estructura puede tener una anchura menor de la que se necesitaría si sólo se proporcionara una única estructura de refuerzo.

Las estructuras de refuerzo alargadas y el material de núcleo definen bordes de apoyo que de manera preferible son sustancialmente perpendiculares a la superficie de la pala de turbina eólica. Una disposición de este tipo es ventajosa porque permite que las estructuras de refuerzo se fabriquen a bajo coste. Además, durante la operación de moldeo, es posible colocar el material de núcleo en el molde antes que las estructuras de refuerzo, y usar los bordes del material de núcleo para facilitar la ubicación de las estructuras de refuerzo en el molde. Esto no siempre sería posible necesariamente si los bordes de apoyo de las estructuras de refuerzo no fueran perpendiculares. La dirección perpendicular es además la dirección de grosor de la pala de turbina eólica.

La pala de turbina eólica comprende además preferiblemente, dentro de cada semicarcasa, una malla precurada ubicada entre el revestimiento exterior y al menos una de las estructuras de refuerzo alargadas. Además o alternativamente, la pala de turbina eólica comprende también preferiblemente, dentro de cada semicarcasa, una malla precurada ubicada entre el revestimiento interior y al menos una de las estructuras de refuerzo alargadas. En cada caso, la malla puede estar compuesta a partir de tejido de vidrio y resina precurada. La pala comprende preferiblemente, dentro de al menos una de las semicarcasas, una malla precurada ubicada entre el revestimiento exterior y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas y el material de núcleo. La pala comprende preferiblemente, dentro de al menos una de las semicarcasas, una malla precurada ubicada entre el revestimiento interior y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas y el material de núcleo.

Tales mallas proporcionan una rigidez adicional en las zonas de transición entre las estructuras de refuerzo y el material de núcleo. Además, las mallas impiden eficazmente que se arruguen los revestimientos interior y exterior de las palas de turbina, lo que podría ocurrir por lo demás si hubiera huecos entre las estructuras de refuerzo subyacentes y el material de núcleo o si el grosor de las estructuras de refuerzo fuera diferente del grosor del material de núcleo.

La pila tiene preferiblemente una sección transversal sustancialmente rectangular a lo largo de toda su longitud y/o preferiblemente una anchura sustancialmente constante. Además, las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas tienen preferiblemente una sección transversal sustancialmente uniforme.

Al formar la estructura de refuerzo a partir de una pila de capas es posible formar toda la estructura de refuerzo como un componente independiente y luego incorporar toda la estructura de refuerzo en una única operación.

Además, dado que las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas son baratas de fabricar, y pueden cortarse fácilmente a cualquier longitud deseada, la estructura de refuerzo resultante puede construirse convenientemente, por tanto, a bajo coste.

Una ventaja adicional de esta disposición es que resulta posible ajustar el grosor de la pila en cualquier punto a lo largo de su longitud, para adaptarse al perfil de grosor deseado de la carcasa exterior de la pala de la turbina eólica, simplemente seleccionando el número de capas que van a incorporarse en la pila en ese punto. Por tanto, es posible formar la estructura de refuerzo con cualquier perfil de grosor deseado que coincida con la forma en sección decreciente de la pala de turbina.

Normalmente, en palas de turbina eólica, es deseable proporcionar un mayor grado de refuerzo a lo largo de la sección central de la pala a lo largo del eje longitudinal de la pala, es decir, la zona a medio camino entre la raíz y la punta de la pala, dado que es ahí donde la pala se encuentra con la mayoría de esfuerzos de tracción. Por tanto, un perfil de grosor particularmente deseable es aquel en el que la sección central de la estructura de refuerzo tiene el grosor máximo, y en el que una o ambas de las secciones de extremo tienen el grosor mínimo.

Por tanto, se prefiere que las capas dentro de la estructura de refuerzo tengan longitudes diferentes de manera que el grosor de la pila vaya decreciendo hacia al menos un extremo.

En la disposición más sencilla, en la que cada capa de la pila tiene extremos de corte cuadrado, esto dará como resultado una pila que tiene una sección decreciente de manera escalonada, siendo la altura de cada escalón el grosor de cada capa. Para reducir la concentración de esfuerzos en los extremos de las capas, es deseable que el perfil de grosor en el extremo de la pila sea más suave. Por tanto, se prefiere que al menos uno de los dos extremos de cada capa esté achaflanado. De esta manera, puede hacerse que la superficie superior de la pila sea más suave a lo largo de toda su longitud.

Aún así, a menos que el chaflán tenga un ángulo lo suficientemente pequeño, seguirán existiendo discontinuidades en el gradiente a lo largo de los extremos que presentan una sección decreciente.

Para aumentar la suavidad todavía más, se prefiere que la pila comprenda además una capa de cobertura que se extiende a lo largo de toda la longitud de la pila. Una capa de cobertura de este tipo puede tener un grosor que es sustancialmente menor que el grosor de las demás capas dentro de la pila, por ejemplo la capa de cobertura puede tener un cuarto del grosor de las demás capas. Esto permite que la capa de cobertura sea lo suficientemente flexible como para "asentarse" sobre la superficie superior de la pila y de ese modo suavizar los cambios en la orientación de la superficie subyacente.

Por ejemplo, en la realización preferida, hay cinco capas dentro de cada pila, y el grosor de cada capa es de aproximadamente 4 mm, es decir entre 3,5 mm y 4,5 mm, mientras que el grosor de la capa de cobertura sólo es de aproximadamente 1 mm, es decir entre 0,5 mm y 1,5 mm. La ventaja de un grosor de 4 mm para cada capa es que las tiras pultruidas pueden suministrarse en un rollo.

La anchura de cada capa es preferiblemente de aproximadamente 150 mm, es decir entre 140 mm y 160 mm, dado que esto proporciona el grado necesario de rigidez del borde para impedir una vibración sustancial del borde.

Se prevén otras realizaciones en las que puede haber únicamente 4 capas o hasta 12 capas dentro de cada pila.

Cada capa dentro de la pila que no sea la capa de cobertura, si ésta existe, puede comprender una única tira de material compuesto fibrosa pultruida que se extiende a lo largo de toda la anchura de la capa. Una disposición de este tipo tiene la ventaja de la sencillez y, por tanto, un bajo coste de fabricación, dado que sólo se requiere una tira dentro de cada capa. Además, dado que cada capa dentro de la pila tiene la misma anchura, todas las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas que no sean la capa de cobertura, si ésta existe, pueden fabricarse a partir del mismo aparato de pultrusión, o de hecho pueden cortarse a partir de la misma tira pultruida.

Alternativamente, cada capa puede comprender una disposición paralela de una pluralidad de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas. Esto puede adoptar la forma de una primera configuración en la que los bordes laterales, o longitudinales, de las tiras dentro de cada capa de la pila están alineados con los bordes laterales (longitudinales) de las tiras en las demás capas, en cuyo caso cada tira tendrá una anchura más pequeña que con la disposición anterior en la que cada capa comprende sólo una tira. Sin embargo, las tiras todavía pueden tener la misma anchura y, por tanto, formarse en el mismo aparato de pultrusión o cortarse a partir de la misma tira pultruida. En una segunda configuración, los bordes laterales (longitudinales) interiores de las tiras dentro de cada capa de la pila están escalonados con respecto a los bordes laterales interiores de las tiras dentro de la o de cada capa adyacente. Aunque esto significa que no todas las tiras tendrán la misma anchura y, por tanto, deben formarse en más de un aparato de pultrusión, esto puede dar como resultado una pila más estable. De hecho, una configuración de este tipo se encuentra normalmente en una pared de ladrillos.

En cada una de las disposiciones anteriores en las que cada capa comprende más de una tira, las tiras dentro de cada capa pueden disponerse alternativamente, o además, extremo con extremo. Esto puede ser ventajoso, por ejemplo, cuando la estructura de refuerzo tiene una longitud sustancial, en cuyo caso la fabricación puede simplificarse al formar la estructura de refuerzo a partir de varias tiras pultruidas relativamente cortas.

Es importante que las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas tengan la suficiente resistencia a la tracción, pero pueden formarse a partir de fibras seleccionadas entre: fibras de carbono; fibras de vidrio; fibras de aramida; y fibras naturales, incluyendo fibras de madera y fibras orgánicas, incluyendo combinaciones de cualquiera de estos tipos de fibra. En la realización preferida las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas están formadas a partir de fibras de carbono integradas en una matriz de resina termoestable. Son particularmente deseables las fibras de carbono debido a su elevada relación resistencia-peso en comparación con otras fibras tales como fibras de vidrio.

En una realización preferida, la estructura de refuerzo incluye un elemento de soporte alargado para soportar la pila

de capas. Esto facilita el procedimiento de mover toda la estructura de refuerzo, cuando está formada, a la posición deseada dentro de la pala de turbina eólica. La configuración preferida del elemento de soporte es un canal que tiene una sección transversal generalmente con forma de U, y en la que la pila de capas está soportada dentro del canal. Esto es particularmente conveniente dado que la pila es sustancialmente rectangular en sección transversal.

- 5 Se prefiere especialmente que al menos la anchura de la sección transversal con forma de U corresponda a la anchura de la pila, dado que en este caso los brazos laterales de la forma de U impedirán cualquier movimiento lateral no deseable de las capas dentro de la pila durante el transporte.

El elemento de soporte puede fabricarse de manera conveniente a partir de un material de plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP) y también puede o bien comprender o bien contener un pararrayos.

- 10 Tal como se ha indicado anteriormente, el elemento de soporte se forma preferiblemente a partir de un material de plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP) y puede comprender un pararrayos.

Los revestimientos están hechos preferiblemente de GRP.

Con esta disposición, cada semicarcasa puede formarse por separado y luego unirse las dos mitades entre sí antes de curar toda la carcasa, con las estructuras de refuerzo en su posición, mediante calentamiento.

- 15 Los revestimientos interior y exterior de las semicarcasas pueden estar compuestos por un material compuesto de resina epoxi de fibra de vidrio.

La pala de turbina eólica comprende además preferiblemente al menos un alma alargada ubicada entre las estructuras de refuerzo dentro de las semicarcasas opuestas para transferir las fuerzas de cizalladura que actúan sobre la pala de turbina eólica en uso. Por tanto, un alma de este tipo puede denominarse "alma de cizalladura". La combinación de dos estructuras de refuerzo de este tipo y el alma emula, y posee las ventajas estructurales de, una viga en I.

- 20

En una realización, cada carcasa comprende dos estructuras de refuerzo, y el alma alargada tiene forma de X en sección transversal. En este caso, cada una de las dos diagonales de la X se extiende preferiblemente entre dos respectivas de las estructuras de refuerzo. Una disposición de este tipo permite proporcionar una única alma para cuatro estructuras de refuerzo.

- 25

El alma con forma de X se forma preferiblemente a partir de dos almas con forma de V conectadas entre sí, dado que las almas con forma de V pueden apilarse o encajarse fácilmente para facilitar el almacenamiento y transporte.

Además, el alma está compuesta preferiblemente por un material elástico para adaptarse más fácilmente a la forma del molde durante la fabricación de las palas de turbina.

- 30 El alma elástica con forma de X se fabrica preferiblemente algo más grande que la distancia entre las dos semicarcasas, de modo que el alma se doblará hasta cierto punto cuando se junten las semicarcasas. No sólo permite que haya tolerancias mayores en el tamaño del alma, sino que además permite que se establezca una buena unión mediante adhesivo entre el alma y las semicarcasas. Una vez que se cura el adhesivo, el alma se bloquea en la posición deseada, y la altura del alma coincide con la separación entre las dos semicarcasas.

- 35 En este caso, el alma comprende preferiblemente una pestaña respectiva en cada extremo de las dos diagonales de la sección transversal con forma de X, para dirigir la fuerza de cizalladura desde toda la anchura de cada estructura de refuerzo hasta el alma.

Como alternativa a la provisión de un alma con forma de X, puede proporcionarse un alma con forma de C convencional, en la que los dos brazos de la C pueden constituir pestañas para fijar el alma entre las semicarcasas exteriores de la pala.

- 40

También puede proporcionarse un alma adicional que tenga una sección transversal con forma de Z. Esto es particularmente deseable cuando hay seis estructuras de refuerzo, dado que puede proporcionarse un alma con forma de X para la absorción de las fuerzas de cizalladura entre cuatro estructuras de refuerzo opuestas, normalmente dentro del borde de ataque de la pala, y el alma con forma de Z puede proporcionarse entonces para absorber las fuerzas de cizalladura entre las dos estructuras de refuerzo opuestas restantes, normalmente dentro de la parte de borde de salida de la pala, es decir situarse entre el alma con forma de X y el borde de salida de la pala. Los términos "borde de ataque" y "borde de salida" se describirán con mayor detalle a continuación.

- 45

En una disposición preferida, cuatro de las estructuras de refuerzo se extienden en direcciones generalmente paralelas a lo largo de la longitud de la pala, mientras que las dos estructuras de refuerzo restantes son más cortas y se extienden alejándose de las otras estructuras de refuerzo en las secciones más anchas de la pala para formar "larguerillos traseros". La separación resultante de las estructuras de refuerzo en las partes anchas de la pala da lugar a una rigidez de borde mejorada. La provisión de los larguerillos traseros también reduce la longitud de la carcasa de pala no soportada entre la estructura principal y el borde de salida, lo que, a su vez, permite que la espuma estructural en la pala sea más delgada. Al mantener una separación entre las estructuras de refuerzo en el

- 50

extremo de raíz de la pala, la terminación de las estructuras puede efectuarse con una concentración reducida de esfuerzos.

5 Los brazos superior e inferior de la Z sirven preferiblemente como pestañas para conectar el alma entre las dos semicarcasas exteriores de la pala, por ejemplo aplicando una capa de adhesivo a las superficies exteriores expuestas de los brazos. Por tanto, sólo la sección central del alma con forma de Z se extiende hasta el espacio entre las estructuras de refuerzo asociadas.

En el caso de un alma con forma de X, las diagonales de la X se doblan preferiblemente en la intersección, de manera que el ángulo entre dos brazos adyacentes es diferente del ángulo entre los otros dos brazos.

Alternativamente, el alma puede tener una sección transversal con forma de Y.

10 En cada caso, el alma o las almas están compuestas preferiblemente por un material elástico. Esto es particularmente beneficioso cuando se conectan entre sí las semicarcasas superior e inferior con las almas en su posición entre las semicarcasas pero fijadas físicamente sólo a la semicarcasa inferior, dado que, al unir las dos semicarcasas entre sí, los extremos libres de las almas a los que puede aplicarse una capa de adhesivo ejercerán una fuerza contra la semicarcasa superior que es suficiente para hacer que los extremos libres de las almas se adhieran a la semicarcasa superior.

En todas las disposiciones descritas anteriormente, los revestimientos interior y exterior se extienden de manera preferible sustancialmente de manera ininterrumpida a lo largo del material de núcleo y las estructuras de refuerzo.

20 Un método de fabricación de una pala de turbina eólica de construcción generalmente hueca y formada a partir de unas semicarcasas opuestas primera y segunda puede comprender construir cada semicarcasa a partir de un revestimiento interior y un revestimiento exterior; ubicar unas estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda en el revestimiento exterior para que se extiendan a lo largo de la dirección longitudinal de la pala; comprendiendo cada estructura de refuerzo una pila de capas, teniendo cada pila un grosor que se extiende en una dirección sustancialmente perpendicular a la superficie de la pala; extendiéndose cada capa a lo largo de la anchura de la pila respectiva, siendo la anchura perpendicular a la dirección longitudinal de la pala y perpendicular al grosor de la pila, y comprendiendo cada capa al menos una tira de material compuesto fibrosa pultruida precurada; disponer dentro de cada semicarcasa un material de núcleo en el revestimiento exterior para que se extienda: (a) entre las estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda; (b) desde la primera estructura de refuerzo alargada hacia el borde de ataque de la pala; y (c) desde la segunda estructura de refuerzo alargada hacia el borde de salida de la pala; disponer el revestimiento interior en la superficie superior de las estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda y el material de núcleo; y disponer un alma alargada para que se extienda entre al menos una de las estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa.

35 En una realización preferida, el método comprende fabricar una pala de turbina eólica del tipo anterior, en la que la una o más estructuras de refuerzo se extienden al menos parte a lo largo de la longitud de la pala de turbina eólica a lo largo de una curva predeterminada respectiva definida por el perfil exterior de la pala de turbina eólica, comprendiendo el método, para la o cada estructura de refuerzo: proporcionar una superficie de soporte alargada sustancialmente rígida dentro de un molde, extendiéndose la superficie de soporte a lo largo de la curva predeterminada y orientándose en cada posición a lo largo de la curva predeterminada en un ángulo que depende del grado de curvatura en esa posición, para facilitar de ese modo una colocación exacta de la estructura de refuerzo; introducir el elemento de soporte en el molde; y situar la estructura de refuerzo a lo largo de la superficie de soporte.

La etapa de situar la estructura de refuerzo puede lograrse deslizando el elemento de soporte a lo largo de la superficie de soporte hacia la curva predeterminada.

45 Orientando adecuadamente la superficie de soporte de esta manera, de modo análogo al peraltado de las carreteras en las curvas, el elemento de soporte puede moverse hasta la posición final deseada dentro del molde deslizándolo a lo largo de la superficie de soporte. De esta manera, la superficie de soporte actúa, por tanto, como superficie de dirección o de guiado para la estructura de refuerzo.

50 Se prefiere que la pila se coloque en el elemento de soporte como primera etapa, y que la estructura de refuerzo completa se mueva hasta su posición de esta manera, aunque naturalmente sería posible mover sólo el elemento de soporte hasta su posición deseada dentro del molde como primera etapa, y luego introducir la pila en el molde, por ejemplo deslizando la pila a lo largo del elemento de soporte. Alternativamente, también sería posible introducir las capas individuales de la pila en el molde una a una.

La superficie de soporte puede ser de manera conveniente una superficie de una cuña alargada dispuesta en la superficie del molde. En este caso, la cuña puede estar compuesta por espuma estructural.

55 En una realización preferida, la pala de turbina eólica comprende al menos una estructura de refuerzo alargada que se extiende en la dirección longitudinal de la pala de turbina eólica a lo largo de una curva predeterminada respectiva definida por el perfil exterior de la pala de turbina eólica, y cada estructura de refuerzo comprende un

elemento de refuerzo soportado dentro de un canal de sección transversal generalmente con forma de U, y el método comprende situar cada estructura de refuerzo dentro de un molde.

En este caso, puede situarse en primer lugar el canal dentro del molde, y luego colocarse el elemento de refuerzo en el canal. Alternativamente, puede situarse en primer lugar el elemento de refuerzo dentro del canal, y luego puede situarse entonces toda la estructura de refuerzo, es decir, el canal que contiene el elemento de refuerzo, dentro del molde.

Puede proporcionarse ventajosamente una superficie de soporte alargada sustancialmente rígida dentro del molde, extendiéndose la superficie de soporte a lo largo de la curva predeterminada y orientándose en cada posición a lo largo de la curva predeterminada en un ángulo que depende del grado de curvatura en esa posición, para facilitar de ese modo una colocación exacta de la estructura de refuerzo; y el método comprende preferiblemente: introducir la estructura de refuerzo en el molde; y situar la estructura de refuerzo a lo largo de la superficie de soporte, por ejemplo deslizando el elemento de soporte a lo largo de la superficie de soporte hacia la curva predeterminada.

Las etapas de introducir la pila precurada y los demás elementos estructurales pueden realizarse en cualquier secuencia deseada.

Alternativamente, la o cada estructura de refuerzo puede construirse a partir del canal con forma de U y las tiras pultruidas individuales *in situ* dentro del molde.

Aunque en la realización preferida hay seis estructuras de refuerzo dentro de la pala de turbina, naturalmente puede haber o bien menos o bien más, dependiendo del tamaño y/o la forma de la pala de turbina y el grado de refuerzo requerido.

La invención también proporciona un método de fabricación de una pala de turbina eólica según la reivindicación 18.

Preferiblemente, el método comprende disponer posteriormente un alma alargada en uno de los semimoldes; hacer pivotar el primer semimolde hasta una posición por encima del segundo semimolde, para que el alma alargada se extienda entre al menos una de las estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y al menos una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa. Preferiblemente, el método comprende ubicar, dentro de al menos uno de los semimoldes, una malla precurada entre el revestimiento exterior y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas y del material de núcleo. Preferiblemente, el método comprende ubicar, dentro de al menos uno de los semimoldes, una malla precurada ubicada entre el revestimiento interior y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas y del material de núcleo.

Aspectos adicionales de la presente divulgación pueden ser tal como sigue:

(a) Una estructura de refuerzo alargada para una pala de turbina eólica, disponiéndose la estructura para que se extienda, en uso, a lo largo de la dirección longitudinal de la pala, comprendiendo la estructura una pila de capas, teniendo la pila una anchura que se extiende, en uso, en una dirección generalmente paralela a una superficie de la pala de turbina eólica, extendiéndose cada capa a lo largo de la anchura de la pila y comprendiendo al menos una tira de material compuesto fibrosa pultruida.

Una estructura de refuerzo de este tipo tiene una construcción más sencilla que las estructuras conocidas y, por tanto, es más barata de fabricar.

Se apreciará que el elemento de soporte para la estructura de refuerzo que se describió anteriormente en relación con una realización preferida proporciona ventajas que no se limitan necesariamente al tipo particular de estructura de refuerzo. Por consiguiente, la presente invención puede extenderse a:

(b) Una pala de turbina eólica que comprende al menos un canal alargado de sección transversal generalmente con forma de U en el que puede estar soportada una estructura de refuerzo alargada.

Se apreciará que la provisión de un alma que tenga una sección transversal con forma de X proporciona ventajas con respecto a las palas de turbina eólica que tienen estructuras de refuerzo que no son necesariamente de los tipos descritos anteriormente. Por este motivo, la presente invención puede extenderse a:

(c) Una pala de turbina eólica de construcción generalmente hueca, estando formada la pala a partir de dos semicarcasas opuestas, comprendiendo cada semicarcasa al menos dos estructuras de refuerzo alargadas que se extienden cada una a lo largo de la dirección longitudinal de la pala, y comprendiendo además un alma ubicada entre las estructuras de refuerzo dentro de las semicarcasas opuestas para transferir las fuerzas de cizalladura que actúan sobre la pala de turbina eólica en uso, teniendo el alma una sección transversal con forma de X.

(d) Una pala de turbina eólica de construcción generalmente hueca, estando formada la pala a partir de unas semicarcasas opuestas primera y segunda, comprendiendo la primera semicarcasa al menos dos estructuras de refuerzo alargadas y comprendiendo la segunda semicarcasa al menos una estructura de refuerzo alargada, extendiéndose cada una a lo largo de la dirección longitudinal de la pala, y comprendiendo además un alma ubicada entre las estructuras de refuerzo dentro de las semicarcasas opuestas, teniendo el alma una sección transversal con

forma de Y.

- (e) Un método de fabricación de una pala de turbina eólica del tipo anterior, en el que la una o más estructuras de refuerzo se extienden al menos parte a lo largo de la longitud de la pala de turbina eólica a lo largo de una curva predeterminada respectiva definida por el perfil exterior de la pala de turbina eólica, comprendiendo el método, para la o cada estructura de refuerzo: proporcionar una superficie de soporte alargada sustancialmente rígida dentro de un molde, extendiéndose la superficie de soporte a lo largo de la curva predeterminada y orientándose en cada posición a lo largo de la curva predeterminada en un ángulo que depende del grado de curvatura en esa posición, para facilitar de ese modo una colocación exacta de la estructura de refuerzo; introducir el elemento de soporte en el molde; y situar la estructura de refuerzo a lo largo de la superficie de soporte.
- (f) Un método de fabricación de una pala de turbina eólica que comprende al menos una estructura de refuerzo alargada que se extiende en la dirección longitudinal de la pala de turbina eólica a lo largo de una curva predeterminada respectiva definida por el perfil exterior de la pala de turbina eólica, y en el que la o cada estructura de refuerzo comprende un elemento de refuerzo soportado dentro de un canal de sección transversal generalmente con forma de U, comprendiendo el método, para la o cada estructura de refuerzo, situar la estructura de refuerzo dentro de un molde.
- (g) Un método de fabricación de una pala de turbina eólica que comprende al menos una estructura de refuerzo alargada que se extiende en la dirección longitudinal de la pala de turbina eólica a lo largo de una curva predeterminada respectiva definida por el perfil exterior de la pala de turbina eólica, comprendiendo el método, para la o cada estructura de refuerzo: proporcionar una superficie de soporte alargada sustancialmente rígida dentro del molde, extendiéndose la superficie de soporte a lo largo de la curva predeterminada y orientándose en cada posición a lo largo de la curva predeterminada en un ángulo en relación con la superficie del molde que depende del grado de curvatura en esa posición, para facilitar de ese modo una colocación exacta de la estructura de refuerzo; introducir la estructura de refuerzo en el molde; y situar la estructura de refuerzo a lo largo de la superficie de soporte, por ejemplo deslizando el elemento de soporte a lo largo de la superficie de soporte hacia la curva predeterminada.
- La o cada estructura de refuerzo puede formarse y precurarse en un molde independiente y luego introducirse, junto con los demás componentes de la pala de turbina eólica, en el molde principal. Con una disposición de este tipo, es posible introducir la estructura de refuerzo precurada en el molde principal sin el uso de los canales con forma de U o los soportes con forma de cuña descritos anteriormente.
- Además, un procedimiento de este tipo es ventajoso con estructuras de refuerzo distintas de las descritas anteriormente. Por ejemplo, estructuras de refuerzo compuestas a partir de paños de fibra, en contraposición a tiras pultruidas, pueden precurarse de esta manera y luego introducirse en el molde principal para formar una pala de turbina eólica. En este caso, puede introducirse cada paño de fibra por separado en el molde, o formarse una pila completa de paños de fibra como primera etapa, que luego se coloca en el molde.
- Por tanto, según un aspecto adicional de la presente divulgación, puede proporcionarse:
- (h) Un método de fabricación de una pala de turbina eólica que comprende al menos una estructura de refuerzo, comprendiendo el método: formar una pila de capas fibrosas; precurar la pila de capas fibrosas en un primer molde; introducir la pila precurada en un segundo molde; introducir otros elementos estructurales de la turbina eólica en el segundo molde; e integrar la pila y los demás elementos estructurales entre sí en el segundo molde.
- Con el fin de que la presente invención pueda entenderse más fácilmente, ahora se describirán realizaciones preferidas de la misma con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:
- la figura 1 ilustra los componentes estructurales principales de una turbina eólica;
- la figura 2 es una ilustración esquemática de la superficie interior de una mitad de la carcasa exterior de una pala de turbina eólica que incorpora estructuras de refuerzo según una realización preferida de la presente invención;
- las figuras 3(a) y 3(b) son esquemas en sección transversal de disposiciones de estructuras de refuerzo dentro de una semicarcasa de una pala de turbina eólica;
- las figuras 4(a) a 4(e) son vistas en sección longitudinal esquemáticas de una pala de turbina eólica que incorpora las estructuras de refuerzo mostradas en la figura 2;
- la figura 5 ilustra una vista en sección transversal lateral de parte de una de las estructuras de refuerzo ilustradas en la figura 2;
- las figuras 6(a) a 6(c) ilustran secciones longitudinales de tres realizaciones diferentes de estructuras de refuerzo según la presente invención;
- las figuras 7(a) y 7(b) son dos representaciones esquemáticas de un alma de sección en X, según una realización preferida, en diferentes posiciones a lo largo de la longitud de una pala de turbina eólica;

la figura 8 es una vista en sección longitudinal de una estructura de refuerzo montada dentro de un molde durante la fabricación de una pala de turbina eólica según una realización preferida;

las figuras 9(a) y 9(b) ilustran un método de fabricación de una pala de turbina eólica según una realización preferida de la presente invención;

- 5 las figuras 10(a) a 10(f) ilustran formas alternativas de alma, según realizaciones adicionales, mostradas en diferentes posiciones a lo largo de la longitud de una pala de turbina eólica;

las figuras 11(a) y 11(b) ilustran formas alternativas de alma adicionales, según realizaciones de la presente invención;

- 10 la figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra etapas en la fabricación de una pala de turbina eólica según una realización preferida de la presente invención;

la figura 13 ilustra un método alternativo en la fabricación de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 14 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas en el método mostradas en la figura 12; y

- 15 las figuras 15(a) a 15(c) ilustran una realización preferida en la que se proporcionan mallas en cada semicarcasa de la pala de turbina eólica.

A lo largo de toda la descripción siguiente de las realizaciones preferidas de la presente invención, y en los dibujos, se usan las mismas referencias numéricas para indicar las mismas, o correspondientes, características estructurales.

- 20 Haciendo referencia a la figura 2, una mitad 8 de la carcasa exterior de una pala de turbina eólica se forma con tres estructuras de refuerzo alargadas 9, 10, 11, que van a describirse con mayor detalle a continuación. Dos de las estructuras de refuerzo 9, 10 se extienden sustancialmente a lo largo de toda la longitud de la pala de turbina desde la sección base 12 hasta la punta de pala 13. La sección base 12 de la pala se forma con insertos metálicos roscados 14 para recibir pernos mediante los cuales la pala se fija al buje central de la turbina eólica, tal como se describió anteriormente con referencia a la figura 1.

- 25 La tercera estructura de refuerzo 11 se extiende sólo en parte a lo largo de la pala desde la sección base 12 y además está desplazada lateralmente con respecto a las otras dos estructuras de refuerzo 9, 10 hacia el borde de salida 15 de la pala y alejándose del borde de ataque 16 de la pala.

Las dos estructuras de refuerzo 9, 10 forman las tapas de larguero de la pala de turbina eólica y la tercera estructura de refuerzo 11 actúa como rigidizador para el borde de salida 15.

- 30 Los extremos de las tres estructuras de refuerzo 9, 10, 11 dentro de la sección de raíz 12 de la pala están envueltos en un material de plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP) para mayor resistencia y mayor estabilidad, al igual que los extremos distales de las dos estructuras de refuerzo 9, 10 que se extienden hasta la punta de pala 13.

- 35 Las partes restantes de la carcasa exterior se llenan de espuma estructural 17, y las estructuras de refuerzo 9, 10, 11 y la espuma estructural 17 se forman todas dentro de un revestimiento exterior y un revestimiento interior que van a describirse con mayor detalle a continuación.

La espuma estructural 17 es un material de núcleo ligero, y se apreciará que pueden usarse otros materiales de núcleo, tal como madera, particularmente madera de balsa, y una estructura alveolar.

La pala de turbina completa se forma a partir de la mitad superior 8 de la carcasa exterior mostrada en la figura 2, junto con una mitad inferior correspondiente y dos almas internas.

- 40 La figura 3(a) ilustra una vista en sección transversal de una disposición convencional en la que cada semicarcasa 8' comprende un revestimiento interior 18' y un revestimiento exterior 19' entre los cuales sólo se proporciona una única estructura de refuerzo 9'. Las zonas entre el revestimiento interior 18' y el revestimiento exterior 19' a cada lado de la estructura de refuerzo 9' se llenan de espuma estructural 17'. Tal como puede verse por el dibujo, hay una curvatura significativa a lo largo de la anchura de la semicarcasa 8'. Dado que la estructura de refuerzo 9' se forma con una sección transversal sustancialmente rectangular, se deduce que se forman cavidades 20' sustanciales entre el revestimiento exterior 19' y la zona central de la estructura de refuerzo 9', y entre el revestimiento interior 18' y las zonas de extremo de la estructura de refuerzo 9'. Durante la fase de moldeo, que va a describirse con detalle a continuación, se introduce resina en estas cavidades 20', lo que no es deseable en una estructura de material compuesto, dado que esto aumenta tanto el peso como el coste de la pala, y también podría dar lugar a problemas estructurales.
- 50

La figura 3(b) es una vista en sección transversal de una realización preferida de la presente invención en la que cada semicarcasa 8 está dotada de al menos dos estructuras de refuerzo 9, 10 proporcionadas entre el

revestimiento interior 18 y el revestimiento exterior 19. Tal como puede verse, el volumen de las cavidades 20 resultantes que se forman entre el revestimiento exterior 19 y la zona central de la estructura de refuerzo 9, y entre el revestimiento interior 18 y las zonas de extremo de la estructura de refuerzo 9 es sustancialmente menor que el de las cavidades 20' que se producen cuando sólo se proporciona una única estructura de refuerzo 9'. Como resultado, la cantidad de resina requerida para llenar las cavidades 20 durante el procedimiento de moldeo es sustancialmente menor.

Además, usando dos estructuras de refuerzo en cada semicarcasa, tal como se muestra en la figura 3(b), en contraposición a la única estructura de refuerzo mostrada en la figura 3(a), las anchuras globales de las estructuras de refuerzo se ubican más cerca del revestimiento exterior 19 de la pala de turbina eólica. Esto es ventajoso por motivos estructurales, dado que proporciona un segundo momento de inercia más elevado de manera que la pala de turbina eólica tiene una mayor resistencia a la flexión.

Las figuras 4(a) a 4(e) son representaciones en sección transversal de la pala de turbina completa en diferentes posiciones a lo largo de la longitud de la pala. La figura 4(a) representa la pala cerca de la punta de pala 13, en la que puede verse que sólo están presentes las dos primeras estructuras de refuerzo 9, 10 en esta posición a lo largo de la longitud de la mitad superior de la carcasa exterior mostrada en la figura 2. La mitad inferior 21 de la carcasa exterior también está dotada de tres estructuras de refuerzo 22, 23, 24, de nuevo sólo dos de las cuales 22, 23 están presentes en esta posición.

Un alma alargada elástica 25 realizada a partir de una capa de madera de balsa o espuma ligera intercalada entre dos capas exteriores de GRP y que tiene una sección longitudinal generalmente con forma de X se proporciona dentro de la carcasa exterior y sirve para transferir las fuerzas de cizalladura que actúan sobre la pala de turbina en uso. Uno de los dos brazos diagonales de la X se extiende entre un primer par de las estructuras de refuerzo 9, 23, y el otro brazo diagonal se extiende entre un segundo par de las estructuras de refuerzo 10, 22.

En la figura 4(b), que representa una posición a lo largo de la longitud de la pala de turbina entre la de la figura 4(a) y la sección central, pueden verse los extremos de las dos estructuras de refuerzo 11, 24 restantes.

La figura 4(c) representa la sección central de la pala de turbina, de la que puede verse que se proporciona un alma alargada elástica 26 adicional que tiene una sección longitudinal generalmente con forma de Z que se extiende entre las dos estructuras de refuerzo 11, 24 en el borde de salida 15 de la pala. Las dos extremidades exteriores de la Z actúan como pestañas para conectar el alma con forma de Z 26 a las dos estructuras de refuerzo 11, 24 asociadas.

Haciendo referencia a la figura 4(d), que es un detalle de la vista en sección transversal de la figura 4(c), la estructura de refuerzo 22 está intercalada entre el revestimiento interior 18 y el revestimiento exterior 19, y las partes restantes de la carcasa exterior se forman a partir de una capa de espuma estructural 17, intercalada también entre los revestimientos interior y exterior 18, 19. Los revestimientos están compuestos por GRP.

La estructura de refuerzo 22 está en forma de una pila 27 de capas de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas soportadas dentro de un canal con forma de U 28, que a su vez se soporta en una cuña alargada 29 de manera que la base del canal 28 está en ángulo agudo con respecto al revestimiento exterior 19 de la carcasa. El canal 28 incluye material que actúa como pararrayos en uso. En otras realizaciones, pueden omitirse el canal con forma de U 28 y la cuña 29.

El extremo del brazo del alma con forma de X 25 está dotado de una pestaña 30 para dirigir la fuerza de cizalladura aplicada a lo largo de toda la anchura de la estructura de refuerzo 22 hasta el alma con forma de X 25.

Se apreciará que la vista ampliada mostrada en la figura 4(d) se aplica igualmente a cada una de las seis estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24.

La figura 4(e) ilustra una vista en sección transversal de la pala entre la sección central representada en la figura 4(c) y la sección de raíz 12, y puede verse que las estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24 dentro de cada semicarcasa están más próximas entre sí que en la sección central de la pala, reflejando la curvatura de las estructuras de refuerzo.

En las figuras 4(a) a 4(e) puede verse que las estructuras de refuerzo 9, 10, 22 y 23 son tapas de larguero que, junto con las almas de cizalladura 25, forman el larguero estructural principal de la pala de turbina eólica. Las estructuras de refuerzo 11 y 24 en el borde de salida rigidizan la pala de turbina eólica en la zona del borde de salida para proporcionar estabilidad contra el pandeo y, junto con el alma 26, forman el larguero de borde de salida.

Cada una de las pilas 27 de las estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24 presenta una sección decreciente longitudinalmente en ambos extremos. Esto se logra mediante una reducción en el número de capas de tiras fibrosas pultruidas desde cinco en la sección central hasta sólo una única capa en cada extremo. Esta característica se indica en los dibujos, en los que, en las figuras 4(a) y 4(e), las pilas 27 respectivas de las estructuras de refuerzo 9, 10, 22, 23, 24 sólo tienen una única capa, mientras que las pilas 27 dentro de la sección central ilustrada en la figura 4(c) tienen cinco capas. Igualmente, en la figura 4(b), las pilas 27 de las estructuras de refuerzo 9, 10, 22, 23 en los extremos del alma con forma de X 25 tienen cinco capas, mientras que las pilas 27 de las estructuras de

refuerzo 11, 24 en los extremos del alma con forma de Z 26 sólo tienen una única capa.

Esta característica permite que las estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24 adopten un perfil compatible con el perfil de grosor de la carcasa exterior de la pala.

5 Esto se ilustra adicionalmente en la vista en sección transversal lateral de la figura 5, que muestra cómo el grosor de la pila 27 de cinco capas 31 va decreciendo tanto hacia el extremo de raíz 12 como hacia el extremo distal 32. Debe destacarse que el dibujo es meramente ilustrativo de la disposición en disminución: en la práctica, la disminución puede distribuirse a lo largo de una gran parte de la longitud de la estructura de refuerzo.

10 Dos características adicionales de la realización preferida potencian la suavidad de la disminución para reducir el impacto de esfuerzos que surgirían con discontinuidades en el perfil de superficie de la pila 27. En primer lugar, cada capa 31 está achaflanada en ambos extremos para eliminar los extremos de corte cuadrado que se forman durante el corte de las tiras pultruidas que forman las capas 31. En segundo lugar, la pila 27 se cubre con una capa superior 33 formada a partir de una tira de material compuesto fibrosa pultruida adicional que tiene un grosor menor que el de las capas subyacentes 31. Dado que la capa superior 33 es más delgada que las demás capas 31, también es más flexible y, por tanto, puede doblarse alrededor de los extremos achaflanados en ángulo de la pila 27 dentro de las zonas de extremo en disminución para formar una superficie superior relativamente suave.

15 Cada capa 31 dentro de la pila tiene un grosor de aproximadamente 4 mm, y el grosor de la capa superior es de aproximadamente 1 mm.

20 Las figuras 6(a) a 6(c) son vistas en sección longitudinal que muestran tres disposiciones diferentes de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas, o tiras de pultrusión 34 dentro de las cinco capas 31. En la figura 6(a), cada capa 31 sólo tiene una única tira de pultrusión 34 dentro de cada capa. En la figura 6(b), cada capa 31 se forma a partir de una disposición paralela de tres tiras de pultrusión 34 de igual anchura colocadas unas al lado de otras. En la figura 6(c), cada capa 31 tiene o bien tres o bien cuatro tiras de pultrusión 34 en una disposición en paralelo unas al lado de otras, pero contiene tiras de pultrusión 34 de dos anchuras diferentes.

25 En las realizaciones preferidas, cada una de las tiras de pultrusión 34 dentro de las tres disposiciones anteriores se extiende a lo largo de toda la longitud de la capa 31 respectiva, aunque puede ser beneficioso en algunas realizaciones que al menos algunas de las capas 31 incluyan tiras 34 más cortas que están dispuestas extremo con extremo.

30 Las figuras 7(a) y 7(b) ilustran con mayor detalle la sección central y la sección de raíz 12 respectivamente de la pala de turbina eólica que muestran el alma elástica con forma de X 25. Las estructuras de refuerzo no se muestran en los dibujos, para mayor claridad. El alma está formada en dos mitades generalmente con forma de V 25a, 25b, y los extremos inferiores de cada mitad 25a, 25b tal como se observa en los dibujos se fijan a la mitad inferior de la carcasa exterior por medio de una capa de adhesivo (no mostrada), y las dos mitades 25a, 25b del alma 25 se unen entre sí mediante pernos 36.

35 La figura 8 es una vista en sección longitudinal que ilustra con mayor detalle la zona de la carcasa exterior que incluye una estructura de refuerzo 22 dentro de un semimolde inferior 37. Durante la fabricación, el revestimiento exterior 19, en forma de un paño de fibra seco, o una pluralidad de paños de fibra secos superpuestos y/o solapantes, se coloca en primer lugar en la superficie del semimolde 37, y luego se sitúan las cuñas alargadas 29 en el revestimiento exterior 19 a lo largo de las zonas curvilíneas donde han de situarse las estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24. El revestimiento interior, descrito adicionalmente a continuación, también está formado por un paño de fibra seco, o una pluralidad de paños de fibra secos superpuestos y/o solapantes. Una vez situados en los semimoldes con otros componentes tal como se describe a continuación, los paños secos se impregnan con resina suministrada en los semimoldes, por ejemplo en un procedimiento de infusión, tal como el que se describe a continuación. Debe señalarse que, como alternativa, también mencionada a continuación, los revestimientos interior y exterior pueden proporcionarse a partir de paños preimpregnados (fibra impregnada previamente), en los que se suministra la resina en los semimoldes junto con el material de fibra de los paños.

40 Las estructuras de refuerzo se sitúan a lo largo de las superficies superiores respectivas de las cuñas 29. Esto puede lograrse situando en primer lugar el canal con forma de U 28 de cada estructura de refuerzo a lo largo de la superficie superior de la cuña 29 y luego introduciendo la pila 27 de capas pultruidas de tiras de material compuesto fibrosas en el canal 28, o alternativamente formando toda la estructura de refuerzo fuera del semimolde 37 y luego colocándola a lo largo de la superficie superior de la cuña 29. En cualquiera de los casos, la estructura de refuerzo puede hacerse descender hasta su posición en la cuña 29 o deslizarse hasta su posición a lo largo de la superficie de la cuña 29.

La orientación de las superficies superiores de las cuñas 29 varía a lo largo de su longitud dependiendo de la curvatura de las zonas lineales para retener las estructuras de refuerzo en las posiciones deseadas.

55 Luego se introduce una capa de espuma estructural 17 en el semimolde 37 para llenar las zonas entre las estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24. El revestimiento interior 18, en forma de paño de fibra seco, o una pluralidad de paños de fibra secos superpuestos y/o solapantes, se coloca entonces en las superficies superiores de

las estructuras de refuerzo y la espuma estructural 17 y los componentes se cubren con una bolsa estanca al aire para formar una cámara de evacuación que se evacua posteriormente y se introduce resina, tal como se describe con mayor detalle a continuación.

5 Entonces se calientan los componentes dentro del semimolde inferior 37 y se cura de ese modo la resina para formar la semicarcasa exterior inferior de la pala.

10 El revestimiento interior 18 y el revestimiento exterior 19 se forman en esta realización a partir de una capa de paño de vidrio biaxial, aunque pueden usarse alternativamente múltiples capas. Tal como se mencionó anteriormente, también sería posible omitir el canal con forma de U 28 y las cuñas alargadas 29 de modo que la pila 27 se forma y se ubica directamente en el revestimiento exterior 19. También sería posible situar la espuma estructural 17 en el revestimiento exterior 19 y entonces introducir posteriormente la pila 28 en el molde 37.

Luego se sitúa un semimolde superior con una carcasa exterior por encima del semimolde inferior 37 para formar la carcasa exterior completa de la pala.

15 La figura 9(a) ilustra la estructura global de los componentes de la mitad inferior de la carcasa exterior cuando están en el semimolde inferior 37. Haciendo referencia a la figura 9(b), después de que el revestimiento interior 18 se ha colocado sobre la superficie de las estructuras de refuerzo 22, 23 y la superficie superior de la espuma estructural 17, una capa de sellado estanca al aire (es decir, una bolsa de vacío) 38 se fija al molde para formar una cámara de evacuación que encapsula todos los componentes, y la cámara se evacua entonces usando una bomba de vacío 39. Con la bomba 39 todavía activada, se conecta un suministro de resina líquida 40 a la cámara para infundir tanto los componentes como los espacios intersticiales entre los mismos. Se aplica un procedimiento de infusión correspondiente a los componentes de la mitad superior de la carcasa exterior. La bomba 39 sigue funcionando durante una operación de moldeo posterior en la que se calienta el molde para curar la resina, aunque durante el procedimiento de curado puede reducirse el grado de la despresurización.

20 El alma con forma de X 25 y el alma con forma de Z 26 se fijan luego por medio de adhesivo al revestimiento interior 18 inmediatamente por encima de las estructuras de refuerzo 22, 23, 24 en el semimolde inferior 37, y los extremos libres superiores de las almas 25, 26 se recubren con capas respectivas de adhesivo.

30 El semimolde superior se hace pivotar entonces hasta su posición por encima del semimolde inferior 37, y los dos semimoldes se conectan entre sí. Esto hace que las estructuras de refuerzo 9, 10, 11 dentro del semimolde superior se adhieran a los extremos libres superiores de las almas 25, 26. La naturaleza elástica de las almas 25, 26 da lugar a una fuerza de desviación de las almas 25, 26 contra las estructuras de refuerzo superiores 9, 10, 11 para garantizar una buena adhesión. El borde de ataque de la pala se forma a lo largo de los bordes de ataque de los semimoldes respectivos, y el borde de salida de la pala se forma a lo largo de los bordes de salida de los semimoldes respectivos.

Luego se abre el molde, y se extrae la pala de turbina terminada del molde.

35 Las figuras 10(a) a 10(f) son ilustraciones en sección transversal de realizaciones alternativas de palas de turbina eólica en las que cada una de las almas 41, 42, 43 tiene una sección transversal con forma de I, lo que, en combinación con las estructuras de refuerzo asociadas, da como resultado una construcción de viga en I. Dado que cada una de las almas está dotada de una pestaña 30 en cada extremo, estas pueden considerarse alternativamente almas de sección en C, en las que los brazos de la forma de C constituyen las pestañas 30.

40 En las figuras 10(a) a 10(c), sólo hay cuatro estructuras de refuerzo 9, 10, 22, 23. La figura 10(a) representa una vista en sección transversal cerca de la punta de pala, la figura 10(b) una vista en sección a medio camino a lo largo de la pala, y la figura 10(c) una vista en sección cerca del extremo de raíz, donde puede verse que la estructura de refuerzo 9, 10, 22, 23 presenta un grosor decreciente. Tal como puede verse a partir de los dibujos, las estructuras de refuerzo dentro de cada semicarcasa están más próximas entre sí cerca de la punta de la pala.

45 En las figuras 10(d) a 10(f), hay seis estructuras de refuerzo 9, 10, 11, 22, 23, 24, y un alma con forma de I 41, 42, 43 respectiva que vincula cada par de estructuras opuestas 9, 19; 10, 23; y 11, 24. La figura 10(d) representa una vista en sección transversal cerca de la punta de pala, la figura 10(e) una vista en sección a medio camino a lo largo de la pala, y la figura 10(f) una vista en sección cerca del extremo de raíz, donde de nuevo puede verse que la estructura de refuerzo 9, 10, 22, 23 presenta un grosor decreciente.

50 Las figuras 11(a) y 11(b) ilustran dos formas de alma adicionales. En la figura 11(a), el alma 44 tiene una sección transversal con forma de X en la que las dos diagonales se acodan en la intersección 45, de modo que las extremidades superiores divergen en un ángulo α que es mayor que el ángulo β entre las dos extremidades inferiores. Una ventaja de esta disposición es que el ángulo grande superior da lugar a una flexibilidad adicional cuando se cierran los dos semimoldes, mientras que las extremidades inferiores sirven meramente para salvar el hueco entre las dos carcasas. En la figura 11(b), las dos extremidades inferiores se han combinado para dar una única extremidad, lo que da como resultado un alma 46 de sección transversal con forma de Y. Un alma de este tipo puede reemplazar las almas con forma de X y/o con forma de Z descritas anteriormente.

55

Haciendo referencia a la figura 12, el método descrito anteriormente puede resumirse en que comprende una etapa 47 de proporcionar la superficie de soporte dentro del semimolde inferior 37, una etapa 48 de introducir las estructuras de refuerzo 9 en el semimolde inferior 37 y una etapa 49 de deslizar las estructuras de refuerzo 9 a lo largo de la superficie de la cuña 29 hasta las posiciones deseadas respectivas.

5 La figura 13 ilustra un método alternativo, en el que las tiras pultruidas 34 se colocan en un molde independiente, proporcionado como un canal con forma de U 28, fuera del semimolde principal 50, junto con una matriz (de resina o adhesivo) que está precurada de modo que la pila 27 se forma en el molde independiente 28. La pila 27 curada precurada se coloca luego en el semimolde principal 50 para un procedimiento de infusión de resina junto con los demás elementos estructurales.

10 Haciendo referencia a la figura 14, este método puede resumirse en que comprende las siguientes etapas: (a) formar una pila de capas fibrosas 51; (b) precurar la pila de capas fibrosas en un primer molde 52; (c) introducir la pila precurada en un segundo molde 53; y (d) integrar la pila y los demás elementos estructurales entre sí en el segundo molde 54. En algunas realizaciones, la pila puede curarse parcialmente en el primer molde y luego curarse totalmente en el segundo molde. En otras realizaciones, la pila puede curarse totalmente en el primer molde e integrarse como tal con los demás elementos estructurales en el segundo molde en el que se curan algunos de los demás elementos estructurales.

Las figuras 15(a) a 15(c) ilustran esquemáticamente una realización preferida adicional, que puede combinarse con cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente. Por motivos de mayor claridad, los elementos no están dibujados a escala. En cada semicarcasa 8 se proporcionan unas mallas precuradas interior y exterior 55, 56 formadas a partir de ligamento de vidrio y resina precurada, y estas se sitúan entre los revestimientos interior y exterior 18, 19 respectivos y las estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10. Las mallas 55, 56 se extienden sobre las zonas donde las estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10 están en contacto con el material de núcleo 17. En la zona de la punta de pala 13, las dos estructuras de refuerzo 9, 10 están separadas con poca distancia, tal como se ilustra en la vista en sección transversal de la figura 15(a) tomada a lo largo de la línea A - A' de la figura 15(c). En este caso, cada una de las mallas interior y exterior 55, 56 se extiende a lo largo de ambas estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10, para cubrir las cuatro zonas de transición entre la estructura de refuerzo 9, 10 y el material de núcleo 17. Sin embargo, en la zona de la sección de raíz 12 de la pala, las dos estructuras de refuerzo 9, 10 están más distanciadas, tal como se ilustra en la vista en sección transversal de la figura 15(b) tomada a lo largo de la línea B - B' de la figura 15(c). En este caso, cada una de las mallas interior y exterior 55, 56 se extiende a lo largo de sólo una respectiva de las estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10 para cubrir sólo las dos zonas de transición entre la estructura de refuerzo respectiva, por ejemplo la 9, y el material de núcleo 17 adyacente.

La función de las mallas interior y exterior 55, 56 es impedir que los revestimientos interior y exterior 17, 18 se arruguen debido a: (a) huecos entre las estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10 y el material de núcleo 17 adyacente; y (b) cualquier pequeña diferencia entre el grosor de las estructuras de refuerzo subyacentes 9, 10 y el grosor del material de núcleo 17.

La figura 15(c) es una vista en planta de esta disposición, a partir de la que puede verse que las mallas 55, 56 forman una forma de V aproximada. Los contornos de las estructuras de refuerzo 9, 10 intercaladas entre las mallas interior y exterior 55, 56 se ilustran en el dibujo mediante la línea discontinua. Los bordes laterales de las mallas interior y exterior 55, 56 se extienden aproximadamente 20 mm sobre el material de núcleo subyacente. También sería posible proporcionar una única malla precurada 55 ubicada debajo de las estructuras de refuerzo 9, 10 y el material de núcleo 17. Sin embargo, en la práctica, es beneficioso que la configuración, es decir las capas interior y exterior 17, 18, las estructuras de refuerzo 9, 10 y la espuma 17, sea simétrica alrededor de un plano de punto medio de la configuración.

Se apreciará que pueden realizarse numerosas variaciones en las realizaciones anteriores sin apartarse del alcance de la presente invención, que está definido únicamente por las reivindicaciones siguientes. Por ejemplo, aunque en la realización preferida hay seis estructuras de refuerzo y tanto un alma con forma de X como un alma con forma de Z, algunas realizaciones alternativas pueden comprender sólo cuatro estructuras de refuerzo y una única alma con forma de X.

En un ejemplo adicional, en vez de usar el método de infusión de resina de fabricación de la pala descrito anteriormente con referencia a la figura 9(b), pueden usarse fibras que se impregnan previamente con resina (es decir, fibras "preimpregnadas") para los revestimientos interior y exterior, en cuyo caso no será necesario infundir resina en la construcción de carcasa. En esta disposición, pueden proporcionarse capas de película adhesiva entre las capas individuales en la pila de modo que se adhieran entre sí cuando se cura la estructura.

REIVINDICACIONES

1. Una pala de turbina eólica de construcción generalmente hueca y formada a partir de unas semicarcasas opuestas primera y segunda;

comprendiendo cada semicarcasa (8) un revestimiento interior curvo (18) y un revestimiento exterior curvo (19) y estando ubicadas unas estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda (9, 10, 22, 23) entre los revestimientos interior y exterior;

extendiéndose cada estructura de refuerzo (9, 10, 22, 23) a lo largo de la dirección longitudinal de la pala y comprendiendo una pila (27) de capas (31);

teniendo cada pila (27) un grosor que se extiende en una dirección sustancialmente perpendicular a la superficie de la pala;

extendiéndose cada capa (31) a lo largo de la anchura de la pila (27) respectiva, siendo la anchura perpendicular a la dirección longitudinal de la pala y perpendicular al grosor de la pila, y comprendiendo cada capa al menos una tira de material compuesto fibrosa pultruida precurada (34);

teniendo cada pila una superficie superior y una superficie inferior que son sustancialmente planas;

teniendo cada pila la forma de un rectángulo oblongo en una sección transversal orientada transversalmente hacia la dirección longitudinal de la pala;

comprendiendo además cada semicarcasa (8) un material de núcleo (17) dispuesto entre los revestimientos interior (18) y exterior (19) y que se extiende: (a) entre las estructuras de refuerzo alargadas primera (9, 22) y segunda (10, 23); (b) desde la primera estructura de refuerzo alargada hacia un borde de ataque (16) de la pala; y (c) desde la segunda estructura de refuerzo alargada hacia un borde de salida (15) de la pala;

comprendiendo además la pala de turbina eólica un alma alargada (41) que se extiende entre al menos una de las estructuras de refuerzo en la primera semicarcasa y al menos una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa.
2. Pala de turbina eólica según la reivindicación 1, en la que las estructuras de refuerzo alargadas (9, 10, 22, 23) y el material de núcleo (17) definen bordes de apoyo que son sustancialmente perpendiculares a la superficie de la pala de turbina eólica.
3. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende además, dentro de cada semicarcasa, una malla precurada (56) ubicada entre el revestimiento exterior (19) y al menos una de las estructuras de refuerzo alargadas (9, 10, 22, 23) y/o una malla precurada ubicada entre el revestimiento interior (18) y al menos una de las estructuras de refuerzo alargadas.
4. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende además, dentro de al menos una de las semicarcasas, una malla precurada (56) ubicada entre el revestimiento exterior (19) y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas (9, 10, 22, 23) y el material de núcleo (17) y/o una malla precurada ubicada entre el revestimiento interior (18) y una zona de apoyo de una de las estructuras de refuerzo alargadas y el material de núcleo.
5. Pala de turbina eólica según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en la que la o cada malla precurada (56) está formada a partir de ligamento de vidrio y resina precurada.
6. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que las capas (31) son de longitudes diferentes de manera que el grosor de la pila (27) va decreciendo hacia al menos un extremo.
7. Pala de turbina eólica según la reivindicación 6, en la que al menos uno de los dos extremos de cada capa (31) está achaflanado.
8. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que cada capa (31) comprende una única tira de material compuesto fibrosa pultruida (34) que se extiende a lo largo de toda la anchura de la capa.
9. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la que cada capa (31) comprende una pluralidad de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas (34).
10. Pala de turbina eólica según la reivindicación 9, en la que la pluralidad de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas (34) comprenden una configuración paralela de tiras dentro de las capas (31).
11. Pala de turbina eólica según la reivindicación 10, en la que los bordes longitudinales de las tiras (34) dentro de cada capa (31) de la pila (27) están alineados con bordes de las tiras en las demás capas.

12. Pala de turbina eólica según la reivindicación 10, en la que los bordes interiores longitudinales de las tiras (34) dentro de cada capa (31) de la pila (27) están escalonados con respecto a los bordes longitudinales interiores de las tiras dentro de la o cada capa adyacente.
- 5 13. Pala de turbina eólica según una cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12, en la que la pluralidad de tiras de material compuesto fibrosas pultruidas (34) comprenden una pluralidad de tiras dispuestas extremo con extremo.
14. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la pila (27) comprende además una capa de cobertura (33) que se extiende a lo largo de toda la longitud de la pila y preferiblemente el grosor de la capa de cobertura es sustancialmente menor que el grosor de las demás capas dentro de la pila.
- 10 15. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que las tiras de material compuesto fibrosas pultruidas (34) están formadas a partir de fibras seleccionadas entre: fibras de carbono; fibras de vidrio; fibras de aramida; y fibras naturales, incluyendo fibras de madera y fibras orgánicas.
- 15 16. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende además un elemento de soporte alargado (28) para soportar la pila (27) de capas y preferiblemente el elemento de soporte comprende un canal de sección transversal generalmente con forma de U, y en la que la pila de capas está soportada dentro del canal.
17. Pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que los revestimientos interior y exterior (18, 19) se extienden sustancialmente de manera ininterrumpida a lo largo del material de núcleo (17) y las estructuras de refuerzo (9, 10, 22, 23).
- 20 18. Método de fabricación de una pala de turbina eólica de construcción generalmente hueca y que comprende unas semicarcasas primera y segunda;

disponiéndose, en cada uno de unos semimoldes curvos alargados primero y segundo, uno o más paños de fibra para los revestimientos exteriores (19) respectivos;

25 ubiéndose, en cada uno de los semimoldes alargados primero y segundo, unas estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda (9, 10, 22, 23) en los paños de fibra para los revestimientos exteriores para que se extiendan a lo largo de la dirección longitudinal de los semimoldes respectivos;

comprendiendo cada estructura de refuerzo (9, 10, 22, 23) una pila (27) de capas (31), teniendo cada pila un grosor que se extiende en una dirección sustancialmente perpendicular a la superficie del semimolde respectivo, y teniendo cada pila la forma de un rectángulo oblongo en una sección transversal orientada
30 transversalmente hacia una dirección longitudinal de la pala;

extendiéndose cada capa (31) a lo largo de la anchura de la pila (27) respectiva, siendo la anchura perpendicular a la dirección longitudinal del semimolde respectivo y perpendicular al grosor de la pila, y comprendiendo cada capa al menos una tira de material compuesto fibrosa pultruida precurada (34);

35 disponiéndose dentro de cada uno de los semimoldes respectivos un material de núcleo (17) en los paños de fibra para el revestimiento exterior (19) para que se extienda: (a) entre las estructuras de refuerzo alargadas primera (9, 22) y segunda (10, 23); (b) desde la primera estructura de refuerzo alargada hacia un borde de ataque del semimolde respectivo; y (c) desde la segunda estructura de refuerzo alargada hacia un borde de salida del semimolde respectivo;

40 disponiéndose, en cada uno de unos semimoldes alargados primero y segundo, en las superficies superiores de las estructuras de refuerzo alargadas primera y segunda y el material de núcleo, uno o más paños de fibra para los revestimientos interiores (18) respectivos;

suministrándose resina (40) al interior de los semimoldes primero y segundo; y

curándose posteriormente la resina (40) para formar las semicarcasas primera y segunda y uniéndose entre sí las dos semicarcasas;

45 en el que los revestimientos interior y exterior (18, 19) son curvos y una superficie superior y una superficie inferior de las pilas (27) son sustancialmente planas.
- 50 19. Método según la reivindicación 18, que comprende disponer posteriormente un alma alargada (41, 42) en uno de los semimoldes; hacer pivotar el primer semimolde hasta una posición por encima del segundo semimolde, para que el alma alargada se extienda entre al menos una de las estructuras de refuerzo (9, 10, 22, 23) en la primera semicarcasa y al menos una de las estructuras de refuerzo en la segunda semicarcasa.

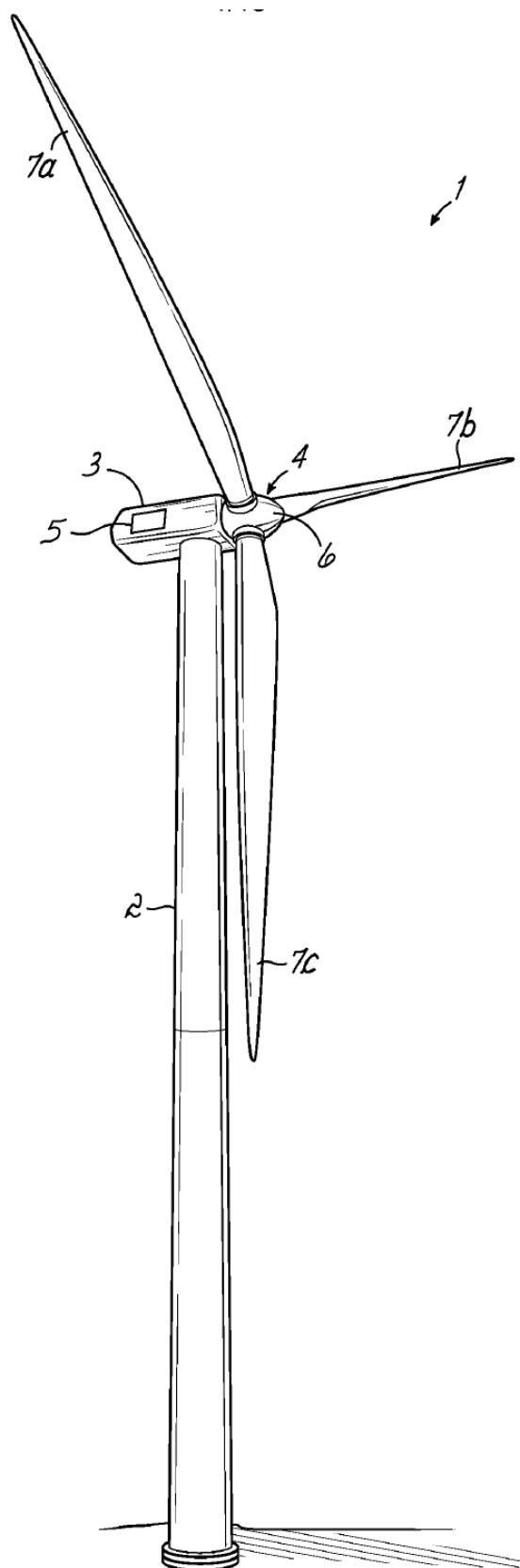


FIG. 1

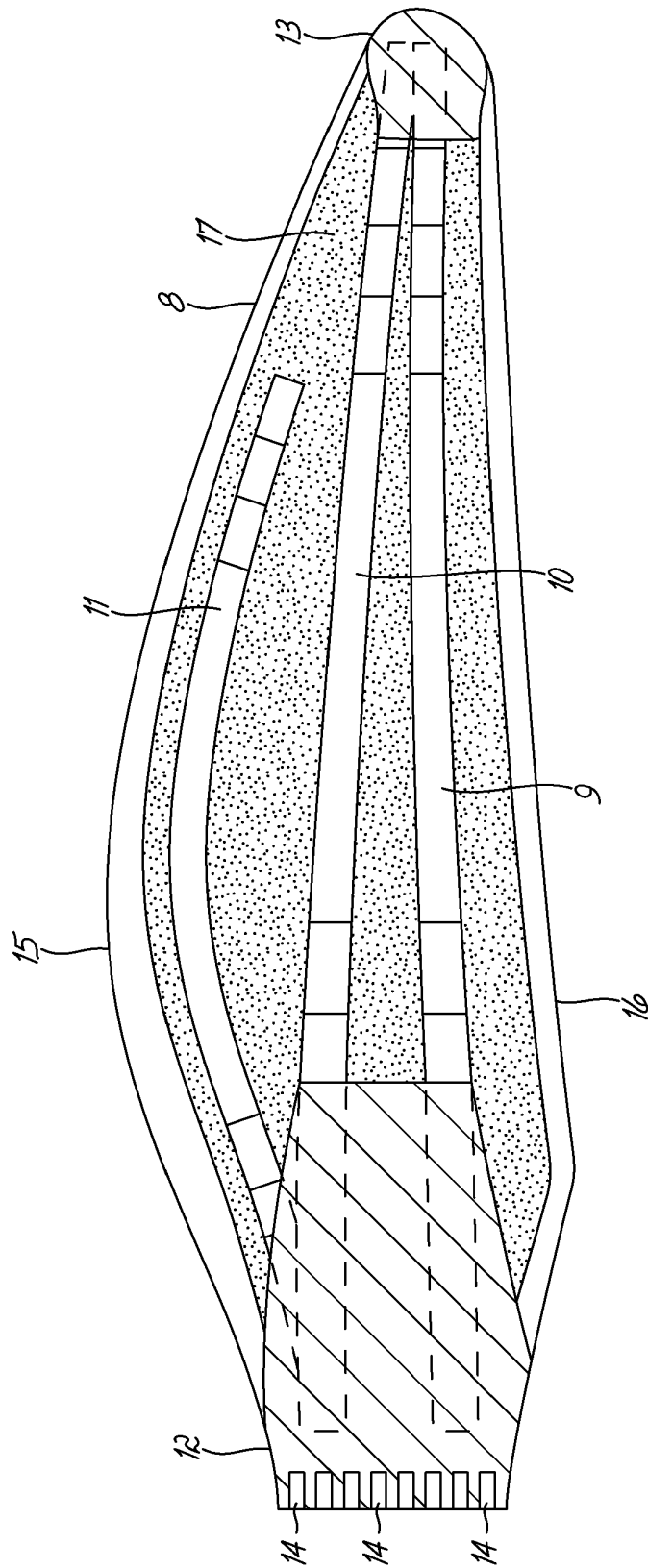


FIG. 2

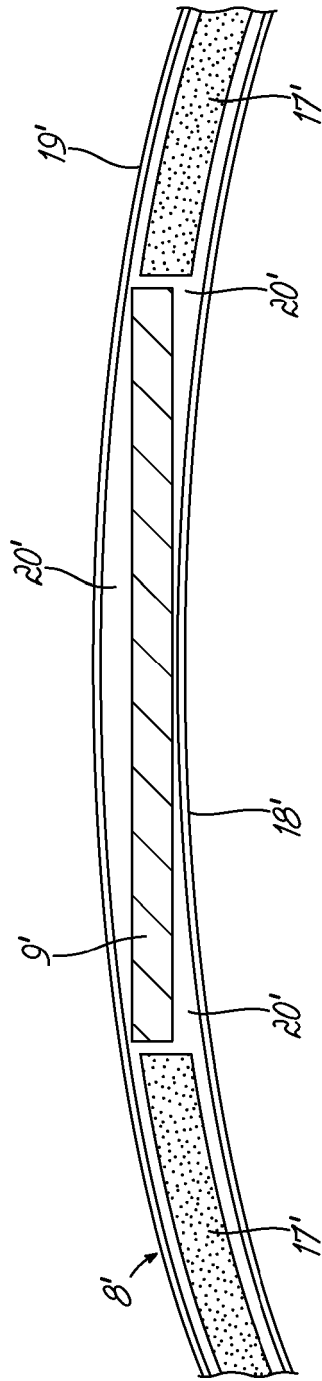


FIG. 3A

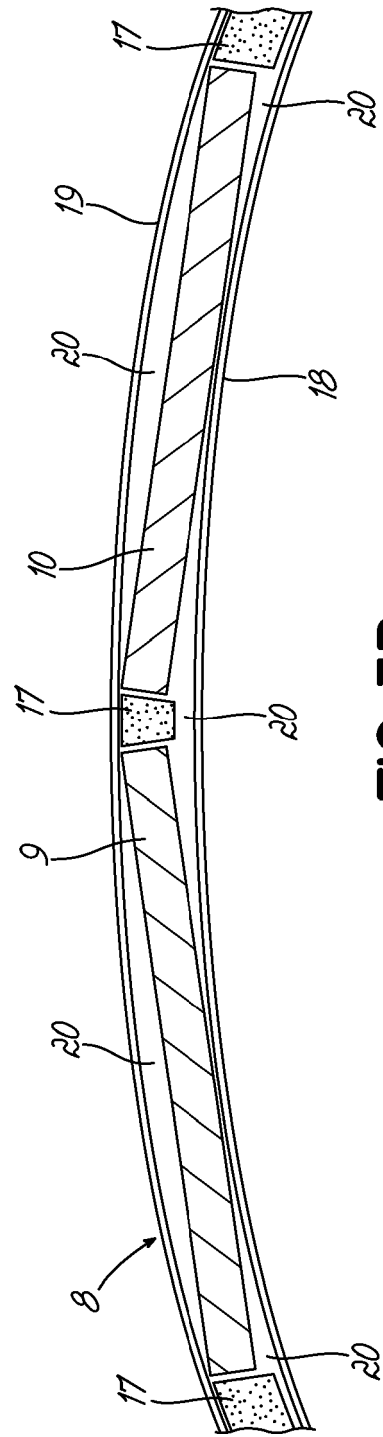


FIG. 3B

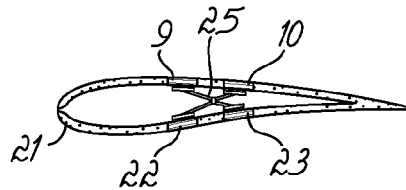


FIG. 4A

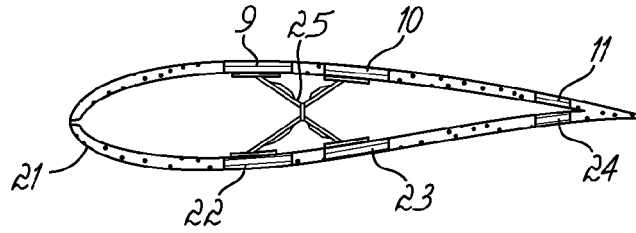


FIG. 4B

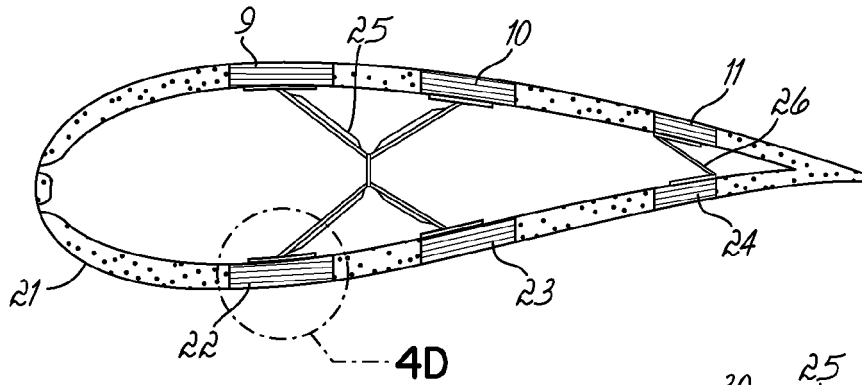


FIG. 4C

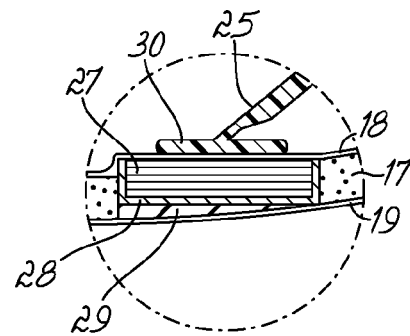


FIG. 4D

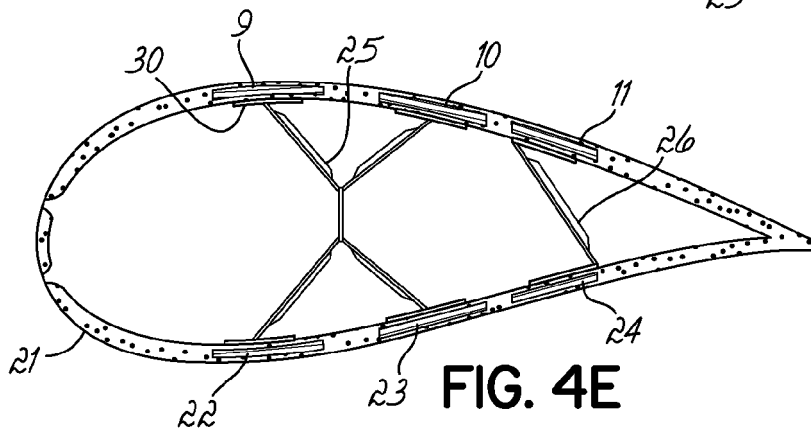


FIG. 4E

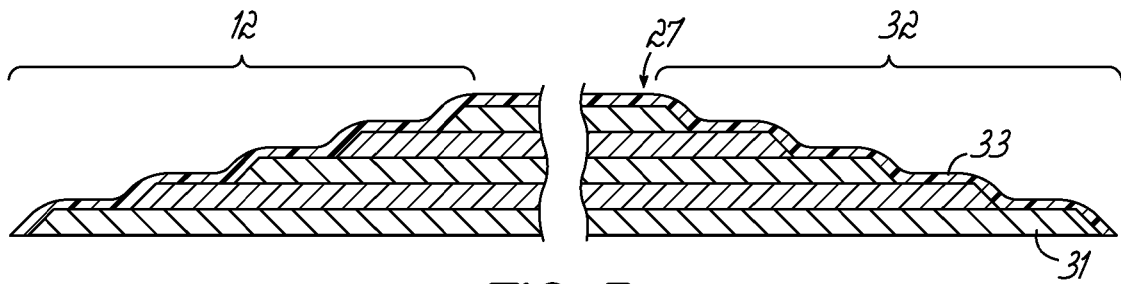


FIG. 5

FIG. 6A

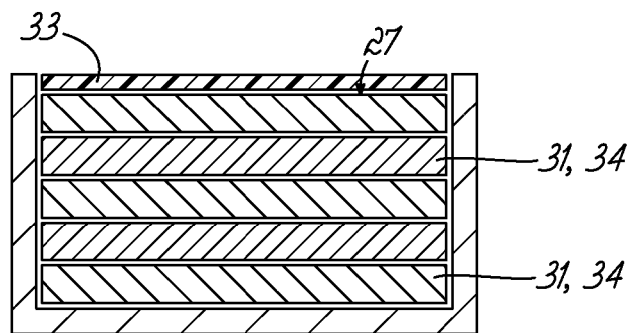


FIG. 6B

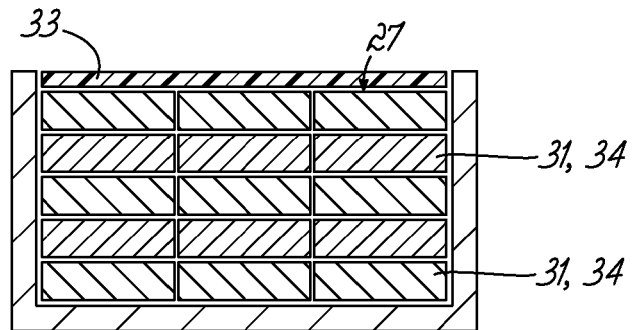
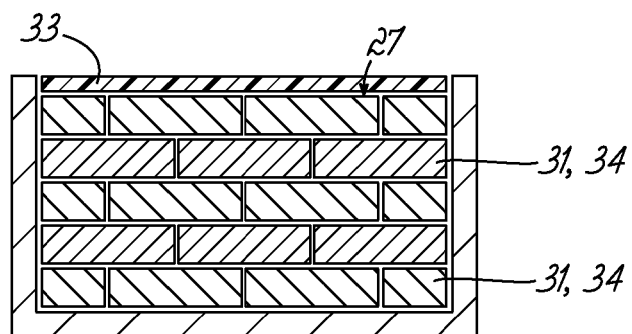


FIG. 6C



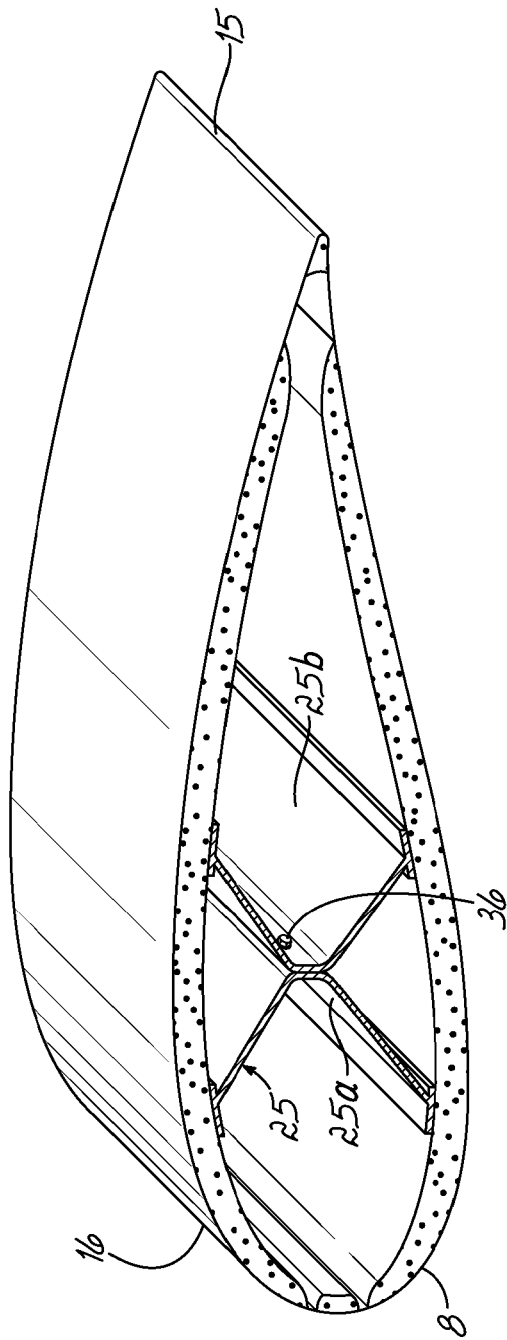


FIG. 7A

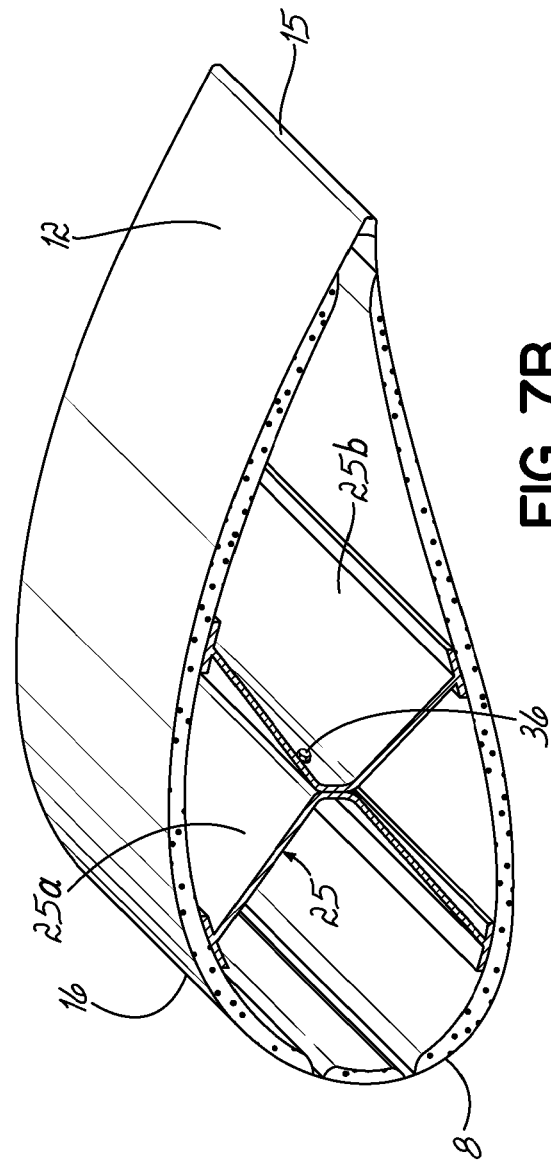


FIG. 7B

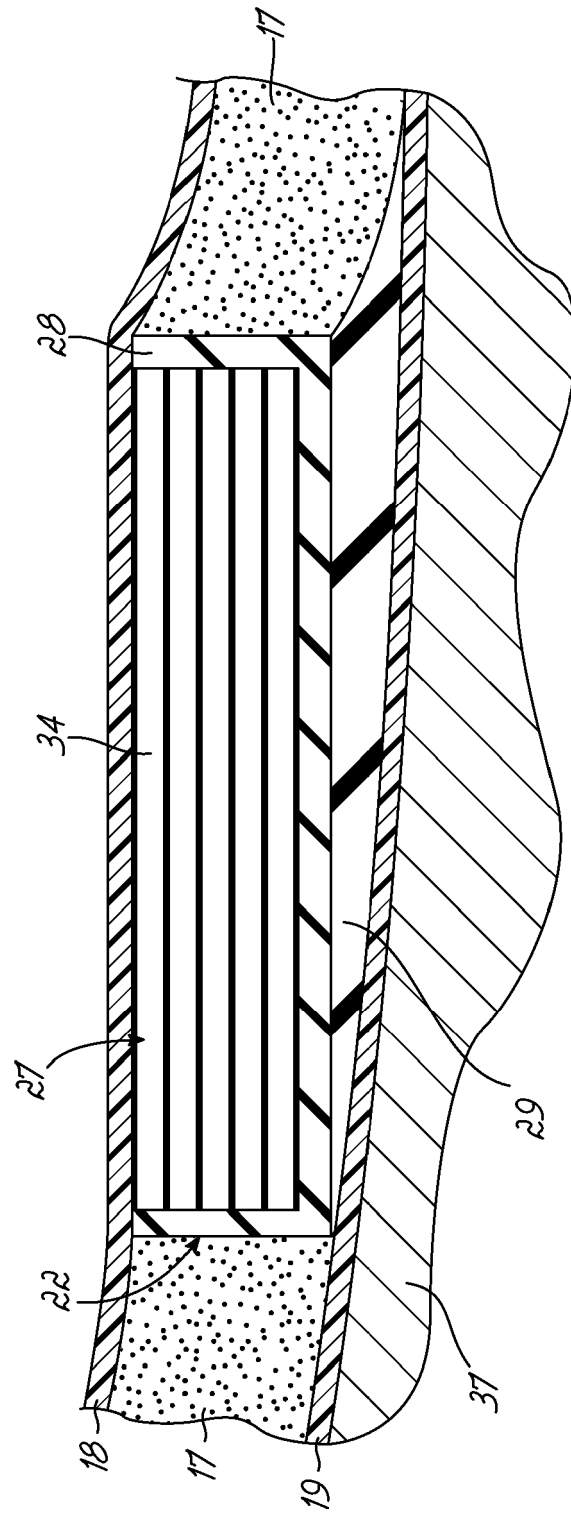


FIG. 8

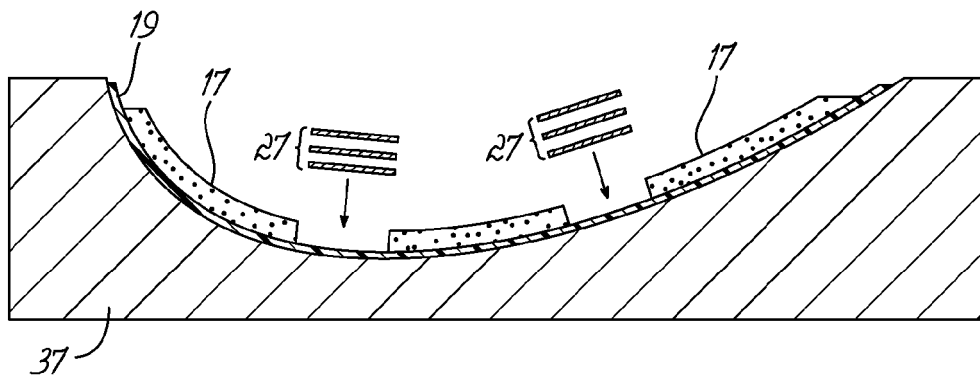


FIG. 9A

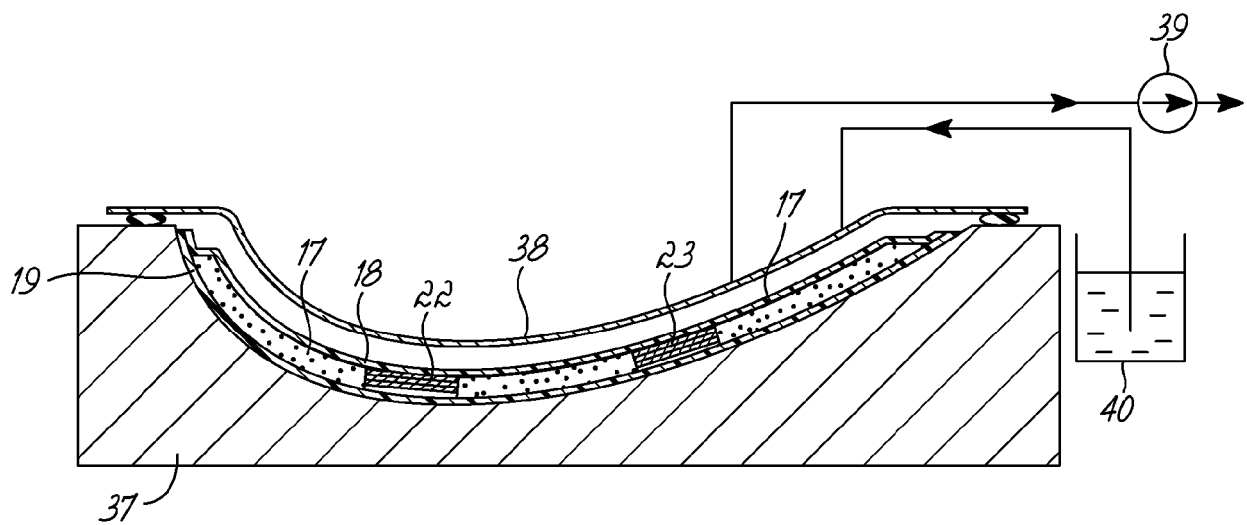


FIG. 9B

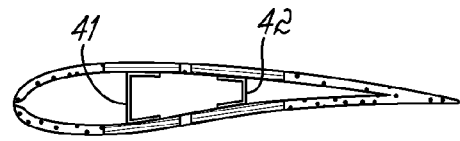


FIG. 10A

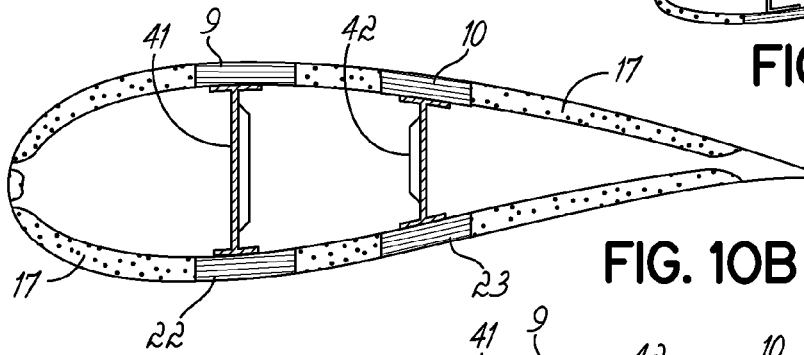


FIG. 10B

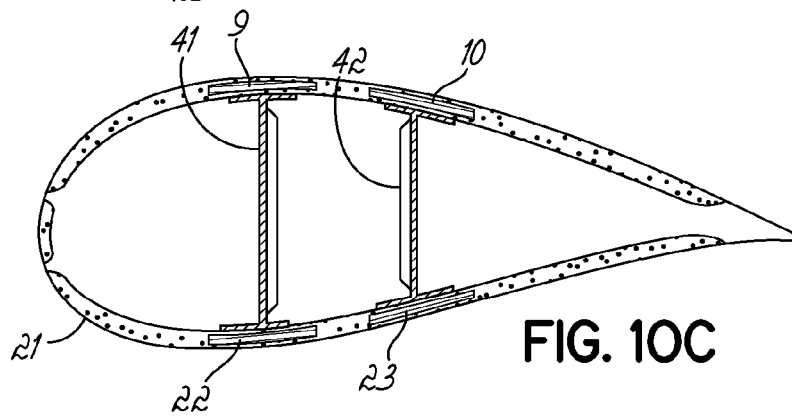


FIG. 10C

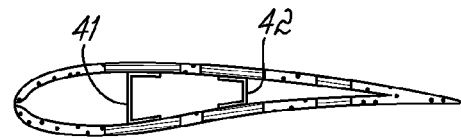


FIG. 10D

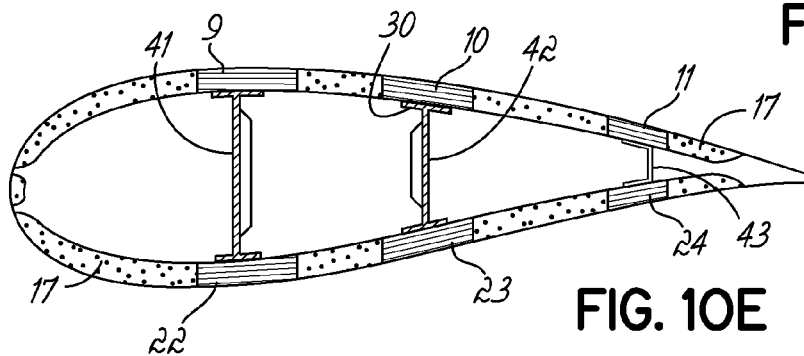


FIG. 10E

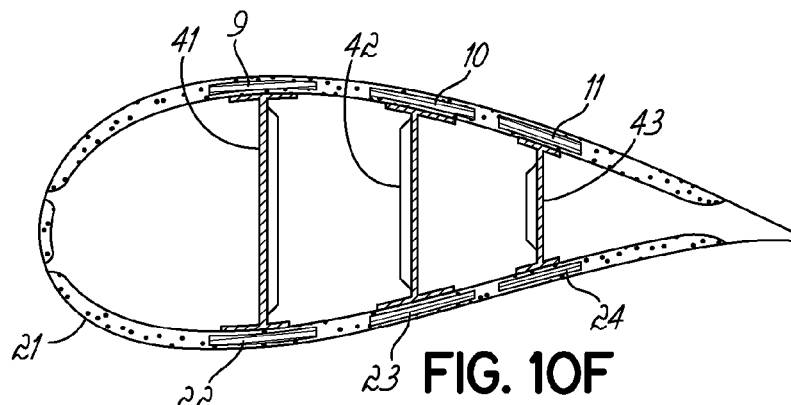


FIG. 10F

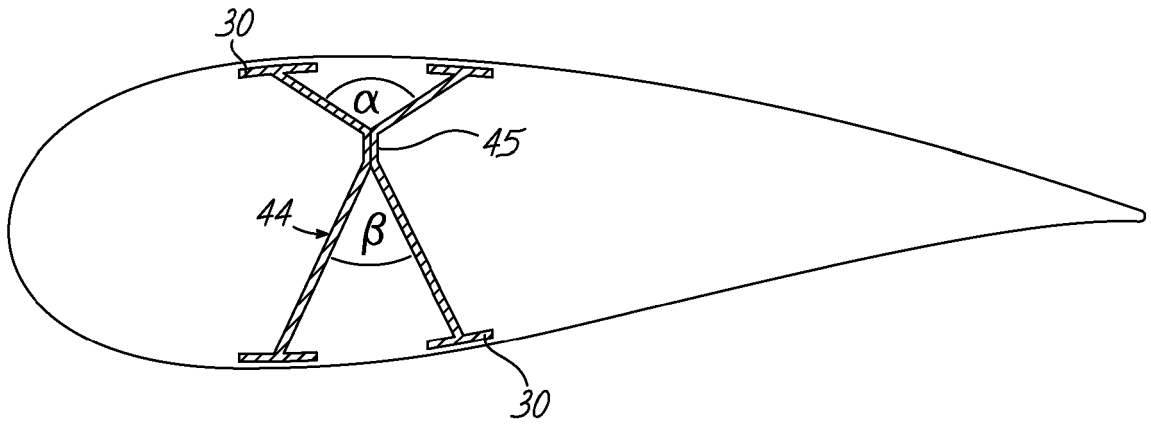


FIG. 11A

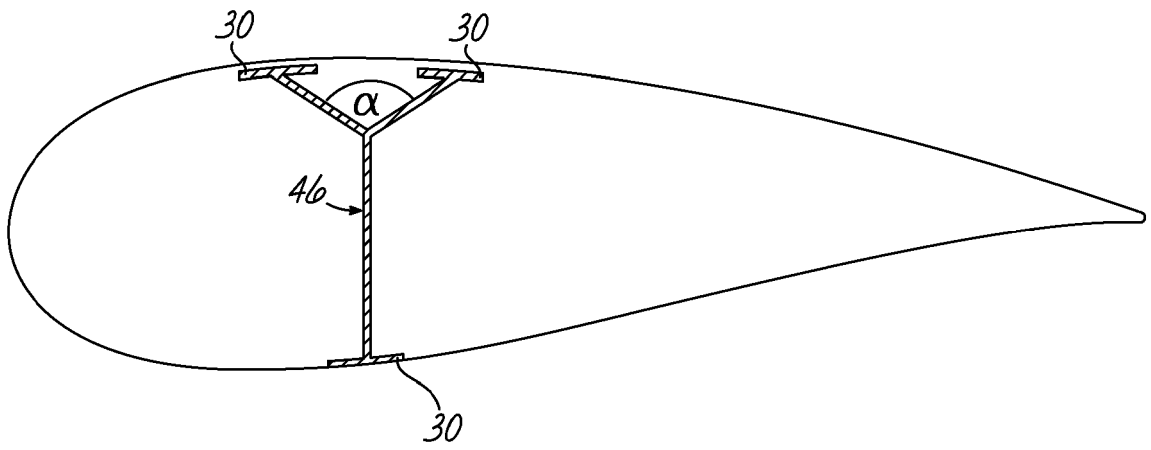


FIG. 11B

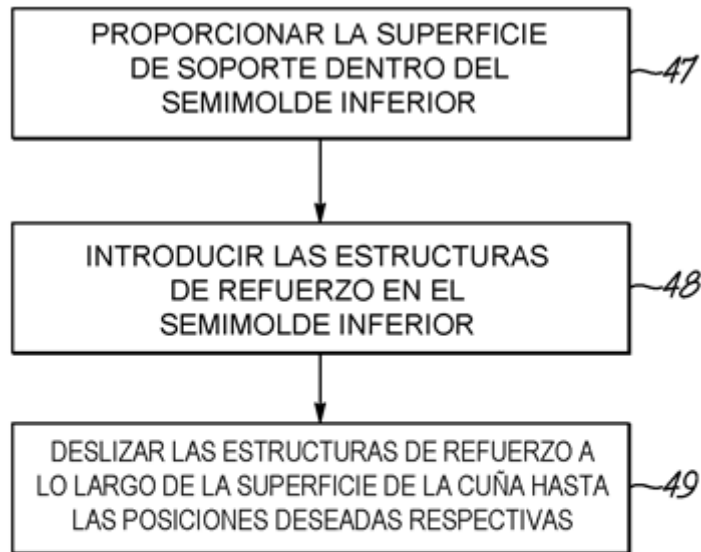


FIG. 12

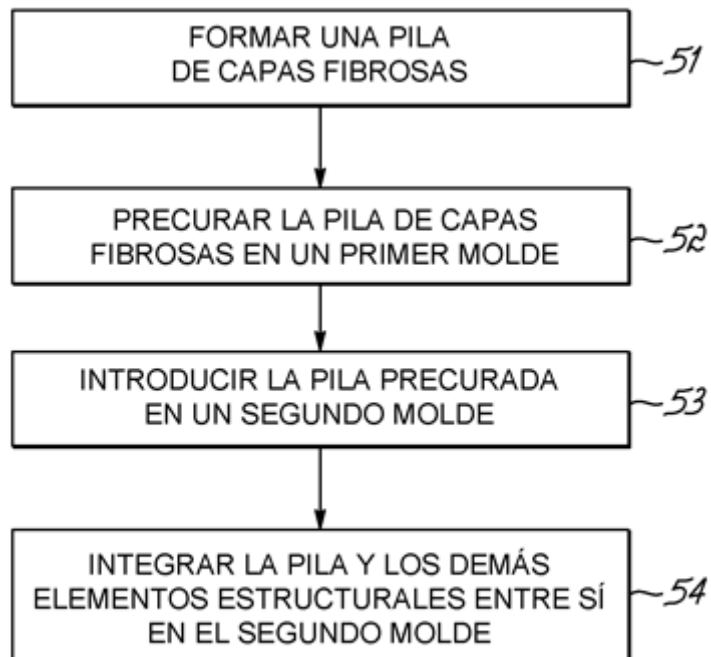


FIG. 14

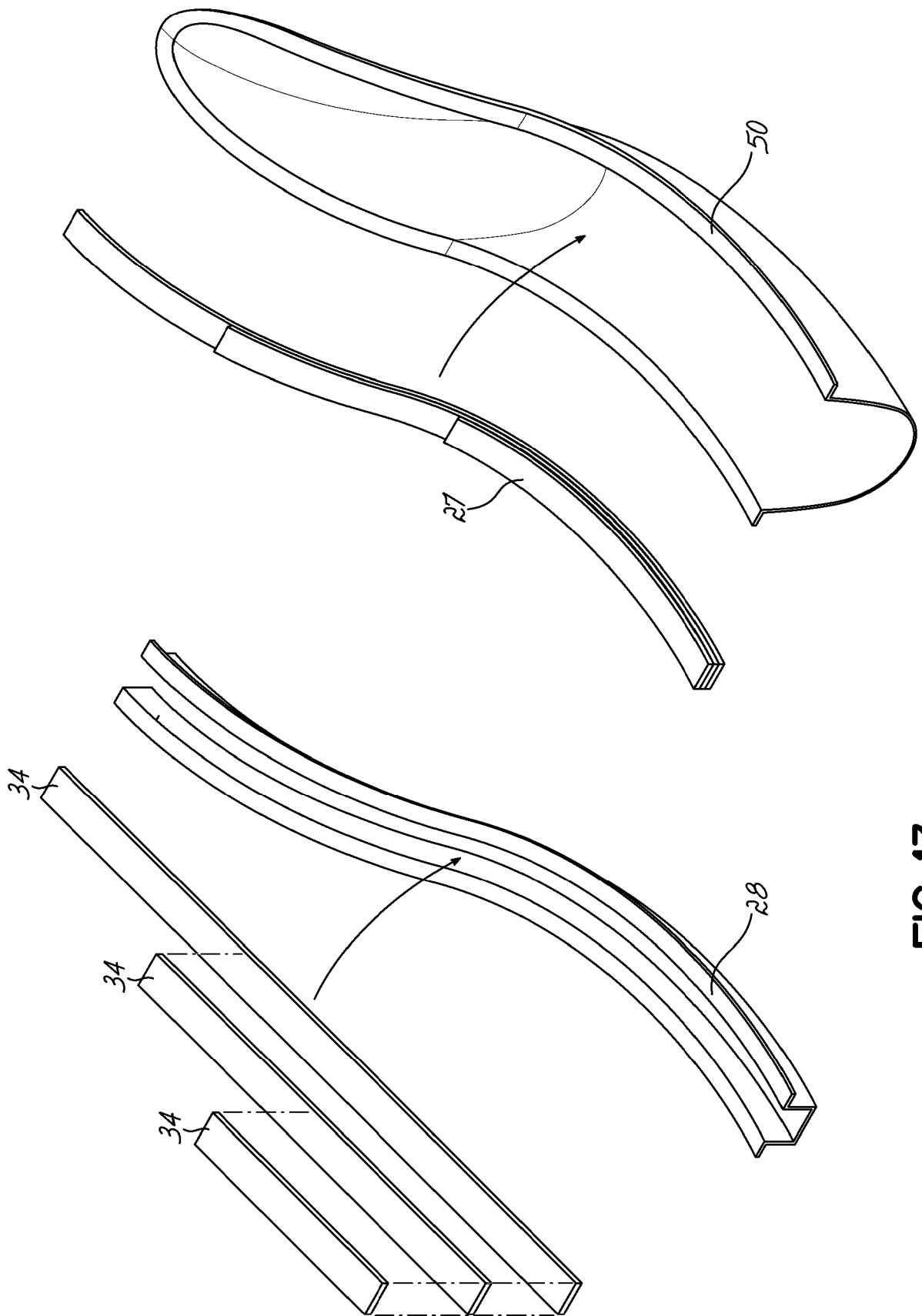


FIG. 13

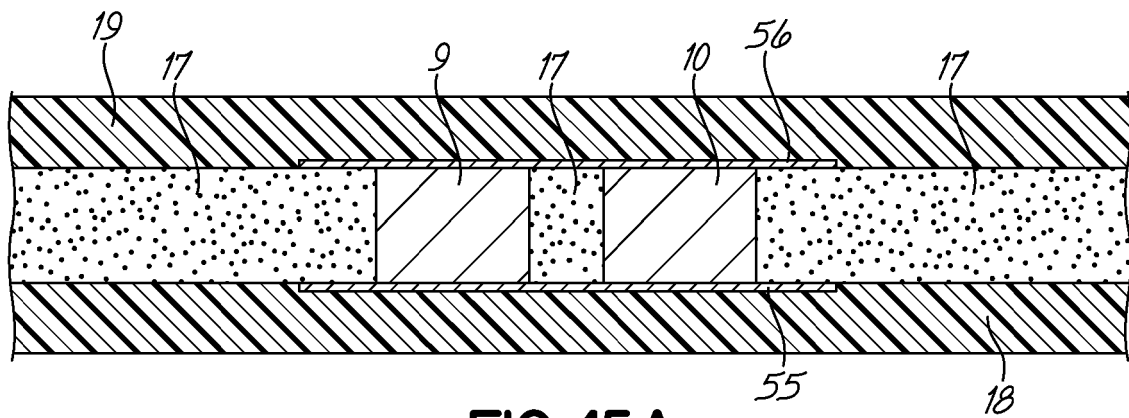


FIG. 15A

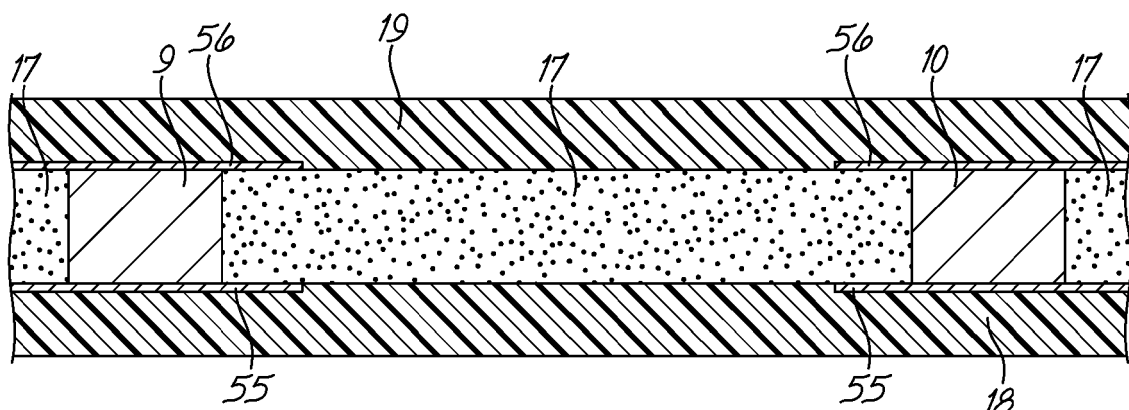


FIG. 15B

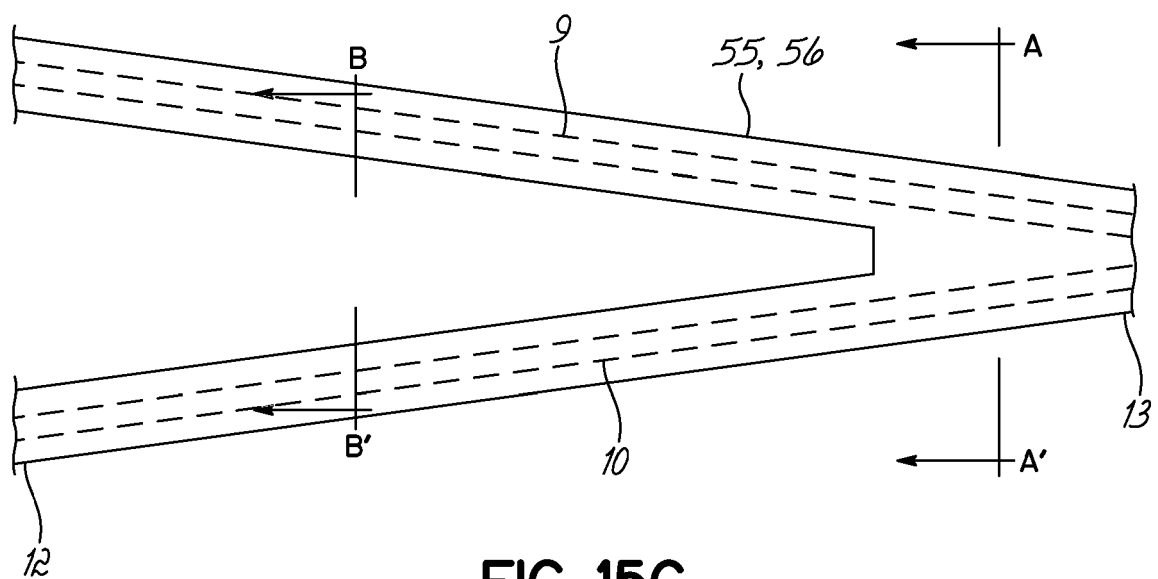


FIG. 15C