

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 273**

51 Int. Cl.:

B29C 65/00 (2006.01)

F03D 1/06 (2006.01)

B29C 65/48 (2006.01)

B29C 70/44 (2006.01)

B29L 31/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.12.2013 PCT/EP2013/077092**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.06.2014 WO14096002**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2013 E 13815465 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2019 EP 2934857**

54 Título: **Pala de turbina eólica que comprende una carcasa de pala aerodinámica con rebaje y cordón de larguero prefabricado**

30 Prioridad:

18.12.2012 EP 12197879

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

23.10.2019

73 Titular/es:

**LM WP PATENT HOLDING A/S (100.0%)
Jupitervej 6
6000 Kolding, DK**

72 Inventor/es:

**DAHL, MARTIN y
NIELSEN, LARS**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 728 273 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

Pala de turbina eólica que comprende una carcasa de pala aerodinámica con rebaje y cordón de larguero prefabricado

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a un método para fabricar una pala de turbina eólica y productos intermedios de una pala de turbina eólica. La invención se refiere además a una pala de turbina eólica y productos intermedios de la pala de turbina eólica.

Antecedentes

10 A menudo, se fabrican palas de turbina eólica según uno de dos diseños de construcción, concretamente un diseño en el que una carcasa aerodinámica fina se pega sobre una viga de larguero, o un diseño en el que cordones de larguero, también denominados laminados principales, se integran en el interior de la carcasa aerodinámica.

15 En el primer diseño, la viga de larguero constituye la estructura de soporte de caga de la pala. La viga de larguero, así como la carcasa aerodinámica o partes de carcasa se fabrican de manera independiente. La carcasa aerodinámica se fabrica a menudo como dos partes de carcasa, normalmente como una parte de carcasa de lado de presión y una parte de carcasa de lado de succión. Las dos partes de carcasa se pegan o se conectan de otro modo a la viga de larguero y se pegan además entre sí a lo largo de un borde de ataque y un borde de fuga de las partes de carcasa. Este diseño tiene la ventaja de que la estructura portadora de carga crítica puede fabricarse de manera independiente y, por tanto, es más fácil de controlar. Además, este diseño permite diversos métodos de fabricación diferentes para producir la viga, tal como moldeo y bobinado de filamento.

20 En el segundo diseño, los cordones de larguero o laminados principales se integran en el interior de la carcasa y se moldean junto con la carcasa aerodinámica. Los laminados principales comprenden normalmente un número alto de capas de fibra en comparación con el resto de la pala y pueden formar un engrosamiento local de la carcasa de turbina eólica, al menos con respecto al número de capas de fibra. Por tanto, el laminado principal puede formar una inserción de fibra en la pala. En este diseño, los laminados principales constituyen la estructura portadora de carga. La carcasa de palas está diseñada normalmente con un primer laminado principal integrado en la parte de carcasa de lado de presión y un segundo laminado principal integrado en la parte de carcasa de lado de succión. El primer laminado principal y el segundo laminado principal se conectan normalmente por medio de una o más almas de cizalladura, que por ejemplo pueden ser en forma de C o en forma de I. Para palas muy largas, las carcasas de palas además a lo largo de al menos una parte de la extensión longitudinal comprenden un primer laminado principal adicional en la carcasa de lado de presión, y un segundo laminado principal adicional en la carcasa de lado de succión. Estos laminados principales adicionales también pueden conectarse por medio de una o más almas de cizalladura. Este diseño tiene la ventaja de que es más fácil de controlar la forma aerodinámica de la pala por medio del moldeo de la parte de carcasa de pala.

35 La infusión de vacío o VARTM (moldeo por transferencia de resina asistido por vacío) es un método, que se emplea normalmente para fabricar estructuras compuestas, tales como palas de turbina eólica que comprenden un material de matriz reforzado con fibra.

40 Durante el procedimiento de llenar el molde, un vacío, entendiéndose dicho vacío en esta conexión como una subpresión o presión negativa, se genera por medio de salidas de vacío en la cavidad de molde, mediante lo cual se atrae polímero líquido al interior de la cavidad de molde por medio de los canales de entrada con el fin de llenar dicha cavidad de molde. Desde los canales de entrada, el polímero se dispersa en todas direcciones en la cavidad de molde debido a la presión negativa cuando un frente de flujo se mueve hacia los canales de vacío. Por tanto, es importante situar los canales de entrada y canales de vacío óptimamente con el fin de obtener un llenado completo de la cavidad de molde. Sin embargo, asegurar una distribución completa del polímero en toda la cavidad de molde es a menudo difícil y, por consiguiente, esto da como resultado, a menudo, denominados puntos secos, es decir, zonas con material de fibra que no están suficientemente impregnadas con resina. Por tanto, los puntos secos son zonas en las que el material de fibra no se impregna y en las que puede haber bolsas de aire, que son difíciles o imposibles de retirar controlando la presión de vacío y una posible sobrepresión en el lado de entrada. En técnicas de infusión de vacío que emplean una parte de molde rígida y una parte de molde resiliente en forma de una bolsa de vacío, los puntos secos pueden repararse después del procedimiento de llenar el molde punzando la bolsa en la ubicación respectiva y extrayendo aire, por ejemplo, por medio de una aguja de jeringa. Opcionalmente, puede inyectarse polímero líquido en la ubicación respectiva y, por ejemplo, esto puede hacerse también por medio de una aguja de jeringa. Este es un procedimiento que requiere mucho tiempo y tedioso. En el caso de partes de molde grandes, el personal tiene que estar de pie sobre la bolsa de vacío. Esto no es deseable, especialmente cuando el polímero no se ha endurecido, ya que puede dar como resultado deformaciones en el material de fibra insertado y, por tanto, un debilitamiento local de la estructura, que puede provocar, por ejemplo, efectos de pandeo.

55 En la mayoría de los casos, el polímero o resina aplicada es poliéster, viniléster o epoxi, pero también puede ser PUR o pDCPD, y el refuerzo de fibra se basa muy a menudo en fibras de vidrio o fibras de carbono. Los epoxis tienen ventajas con respecto a diversas propiedades, tales como contracción durante el curado (que, a su vez, lleva potencialmente a menos arrugas en el laminado), propiedades eléctricas y resistencias mecánica y a la fatiga. Poliéster

5 y vinilésteres tienen la ventaja de que proporcionan propiedades de unión mejores a recubrimientos de gel. De ese modo, un recubrimiento de gel puede aplicarse a la superficie externa de la carcasa durante la fabricación de la carcasa aplicando un recubrimiento de gel al molde antes de disponerse el material de refuerzo de fibra en el molde. Por tanto, pueden evitarse diversas operaciones posmoldeo, tales como pintar la pala. Además, poliésteres y vinilésteres son más baratos que los epoxis. Por consiguiente, el procedimiento de fabricación puede simplificarse y los costes pueden reducirse.

10 A menudo, las estructuras compuestas comprenden un material de núcleo cubierto con un material reforzado con fibra, tal como una o más capas de polímero reforzadas con fibra. El material de núcleo puede usarse como espaciador entre tales capas para formar una estructura intercalada y está hecho normalmente de un material rígido y ligero de peso con el fin de reducir el peso de la estructura compuesta. Con el fin de asegurar una distribución eficiente de la resina líquida durante el procedimiento de impregnación, el material de núcleo puede estar dotado de una red de distribución de resina, por ejemplo, proporcionando canales o ranuras en la superficie del material de núcleo.

15 A medida, por ejemplo, que las palas para turbinas eólicas se han vuelto cada vez más grandes a lo largo del tiempo y ahora pueden ser de más de 60 metros de largo, el tiempo de impregnación en conexión con la fabricación de tales palas ha aumentado, ya que ha de impregnarse con polímero más material de fibra. Además, el procedimiento de infusión se ha vuelto más complicado, ya que la impregnación de grandes elementos de carcasa, tales como palas, requiere un control del frente de flujos para evitar puntos secos, dicho control puede incluir, por ejemplo, un control basado en el tiempo de canales de entrada y canales de vacío. Esto aumenta el tiempo requerido para atraer o inyectar polímero. Como resultado, el polímero tiene que permanecer líquido durante un periodo de tiempo más largo, normalmente dando también como resultado un aumento en el tiempo de curado.

El moldeo por transferencia de resina (RTM) es un método de fabricación, que es similar al VARTM. En el RTM la resina líquida no se atrae al interior de la cavidad de molde debido a un vacío generado en la cavidad de molde. En su lugar, la resina líquida se fuerza al interior de la cavidad de molde por medio de una sobrepresión en el lado de entrada.

25 El moldeo por preimpregnado es un método en el que se preimpregnan fibras de refuerzo con una resina precatalizada. La resina es normalmente sólida o casi sólida a temperatura ambiente. Los preimpregnados se disponen a mano o a máquina sobre una superficie de molde, se embolsan al vacío y luego se calientan a una temperatura, en la que se permite que la resina vuelva a fluir y finalmente se cure. Este método tiene la principal ventaja de que el contenido de resina en el material de fibra se establece de manera precisa de antemano. Es fácil y limpio trabajar con los preimpregnados y hacen posible la automatización y ahorro en mano de obra. La desventaja con los preimpregnados es que el coste material es más alto que para fibras no preimpregnadas. Además, es necesario que el material de núcleo esté hecho de un material que pueda resistir las temperaturas de procedimiento necesarias para hacer que la resina vuelva a fluir. Puede usarse el moldeo por preimpregnado en conexión con un procedimiento tanto de RTM como de VARTM.

35 Además, es posible fabricar moldes huecos de una pieza mediante el uso de partes de molde externas y un núcleo de molde. Un método de este tipo se describe, por ejemplo, en el documento EP 1 310 351 y puede combinarse fácilmente con RTM, VARTM y moldeo por preimpregnado.

40 El documento WO 2011/035541 A1 da a conocer una pala de turbina eólica de composición de material híbrida, en la que la pala comprende una caja estructural hecha principalmente de preimpregnado basado en epoxi y una carcasa fabricada mediante técnica de infusión de resina que usa poliéster o viniléster. La caja y la carcasa se unen usando un adhesivo.

El documento WO 2004/078443 A1 da a conocer una preforma y un método para preparar unas preformas. La preforma está formada por al menos tres capas de fibras orientadas. En una realización, las capas de fibra pueden desplazarse para formar un lado ahusado para mejorar la movilidad de la preforma.

45 **Divulgación de la invención**

Es un objeto de la invención obtener parcialmente un nuevo diseño de pala y productos intermedios de este diseño, así como un nuevo método para fabricar tales palas de turbina eólica y productos intermedios, y que superen o mejoren al menos una de las desventajas de la técnica anterior o que proporcionen una alternativa útil.

50 Según un primer aspecto, la invención proporciona una pala de turbina eólica que comprende una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón de larguero, y una carcasa aerodinámica que tiene una superficie externa que forma al menos parte de una superficie exterior de la pala de turbina eólica y una superficie interna, en la que la estructura portadora de carga se conecta a la carcasa aerodinámica, y en la que la carcasa aerodinámica comprende un primer rebaje en la superficie interna de la carcasa de pala, y el primer cordón de larguero se dispone en y se conecta al primer rebaje de la carcasa aerodinámica. La carcasa aerodinámica comprende una primera parte engrosada en un primer lado del primer rebaje y una segunda parte engrosada en un segundo lado del primer rebaje. El primer rebaje se ahúsa hacia el primer lado del rebaje y se ahúsa hacia el segundo lado del rebaje. El primer cordón de larguero se ahúsa hacia un primer lado del cordón de larguero, y se ahúsa hacia un segundo lado del cordón de larguero. El primer lado del cordón de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al primer lado del

rebaje, y el segundo lado del cordón de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al segundo lado del rebaje.

- 5 Por tanto, se observa que la primera parte engrosada puede ahusarse hacia (el primer lado de) el rebaje, y la segunda parte engrosada puede ahusarse hacia (el segundo lado de) el rebaje, y que los lados del cordón de larguero se ahúsan de manera correspondiente, de manera que el cordón de larguero cuando se dispone en el rebaje se pone a tope con los lados del rebaje. De ese modo, puede obtenerse una transición gradual entre el cordón de larguero y la estructura de carcasa en el rebaje con baja transición en rigidez, reduciendo de ese modo concentraciones de tensión en la pala de turbina eólica final.
- 10 El ángulo de ahusamiento de los lados del rebaje puede ser por ejemplo de entre 10 y 80 grados. De manera similar, el ángulo de ahusamiento del lado del cordón de larguero puede ser de entre 10 y 80 grados.
- Al fabricar la carcasa aerodinámica y el cordón de larguero de manera independiente y unir más adelante el cordón de larguero al rebaje de la carcasa aerodinámica, se asegura que la estructura portadora de carga pueda situarse de manera muy precisa en la pala terminada y que se logre una transición de rigidez gradual entre las partes ahusadas del cordón de larguero y la carcasa aerodinámica.
- 15 Es evidente que la pala de turbina eólica está formada como una estructura alargada que tiene una dirección longitudinal. Tanto la carcasa aerodinámica como la estructura portadora de carga se forman también, por tanto, como estructuras alargadas conectadas entre sí a lo largo de una superficie de conexión que se extiende en la dirección longitudinal de la pala. Por tanto, también es evidente que el rebaje se extiende en la dirección longitudinal de la pala y la carcasa aerodinámica.
- 20 El diseño con un rebaje proporcionado en la carcasa de pala y el cordón de larguero unido al rebaje permite un procedimiento de fabricación en el que el cordón de larguero y la carcasa aerodinámica pueden fabricarse de manera independiente, y en el que el cordón de larguero puede unirse de manera muy precisa a la carcasa de pala en la posición correcta.
- 25 Según una realización ventajosa, la estructura portadora de carga comprende además un segundo cordón de larguero, y la carcasa aerodinámica comprende además un segundo rebaje en la superficie interna de la carcasa de pala, y en la que el segundo cordón de larguero se dispone en y se conecta al segundo rebaje de la carcasa aerodinámica.
- 30 El primer rebaje puede formarse en una parte de carcasa de lado de presión de la carcasa aerodinámica, y el segundo rebaje puede formarse en una parte de carcasa de lado de succión de la carcasa aerodinámica. Por tanto, es evidente que el primer cordón de larguero forma una parte de estructura portadora de carga unida al lado de presión de la pala, y el segundo cordón de larguero forma una parte de estructura portadora de carga unida al lado de succión de la pala.
- La primera parte engrosada y/o la segunda parte engrosada pueden formarse como una estructura intercalada que comprende un número de capas de revestimiento externas, un número de capas de revestimiento internas y un material de núcleo intercalado intermedio.
- 35 Por tanto, el rebaje puede formarse teniendo una parte no engrosada (o parte de carcasa de rebaje) entre la primera parte engrosada y la segunda parte engrosada. La parte de carcasa de rebaje puede comprender simplemente un número de capas de fibra, por ejemplo, correspondiente al revestimiento interno y externo de las partes engrosadas yuxtapuestas.
- El material de núcleo intercalado intermedio puede ser madera de balsa. El material de núcleo intermedio puede ser también polímero espumado.
- 40 Todas las realizaciones descritas en relación con el primer cordón de larguero y el primer rebaje también pueden aplicarse, naturalmente, al segundo rebaje y el segundo cordón de larguero.
- El cordón de larguero puede formarse, por ejemplo, según cualquiera de las realizaciones descritas en relación con el tercer aspecto, es decir con una cuña de núcleo intercalada en los lados.
- 45 Según una realización ventajosa, el material de núcleo intercalado del cordón/los cordones de larguero es un polímero espumado, y el material de núcleo intercalado de la carcasa aerodinámica es madera de balsa. Esto proporciona una realización en la que la carcasa de pala puede fabricarse con la madera de balsa menos cara. Sin embargo, la madera de balsa puede ser eléctricamente conductora. Al proporcionar un material de polímero espumado en los lados del cordón de larguero, es posible aislar eléctricamente el laminado principal de la madera de balsa, lo que puede ser ventajoso para fines de protección contra rayos, en particular si el cordón de larguero comprende fibras de carbono.
- 50 Según otra realización ventajosa, el primer cordón de larguero comprende un primer reborde o ala dispuesta a lo largo de un primer lado del primer cordón de larguero, y un segundo reborde o ala dispuesto a lo largo de un segundo lado del primer cordón de larguero. El primer reborde (o ala) y el segundo reborde (o ala) están formados como salientes que se extienden desde y a lo largo del primer lado y el segundo lado del primer cordón de larguero. El primer reborde y el segundo reborde pueden formarse como estructuras reforzadas con fibra.

En una realización, el primer reborde de fibra se une a una superficie interna de la primera parte engrosada de la carcasa aerodinámica, y en el que el segundo reborde de fibra se une a una superficie interna de la segunda parte engrosada de la carcasa aerodinámica.

5 Según la invención, se forma una cavidad entre una superficie interna, el rebaje y la primera superficie del cordón de larguero. La cavidad puede formarse mediante los lados de ahusamiento del cordón de larguero y rebaje y/o puede formarse mediante el primer reborde de fibra y el segundo reborde de fibra.

Además, los rebordes o elementos sobresalientes pueden actuar como una barrera de pegamento de modo que solamente pueda inyectarse el pegamento necesario al interior de la cavidad o que pueda retirarse el exceso de pegamento inyectando pegamento desde un extremo longitudinal de la cavidad y recogiendo dicho exceso de pegamento en un segundo extremo de la cavidad.

10 El cordón de larguero puede conectarse al rebaje de la carcasa por medio de un adhesivo que llena la cavidad. En la práctica, el adhesivo puede aplicarse antes de que el cordón de larguero se disponga en el rebaje o puede inyectarse al interior de una cavidad formada entre el cordón de larguero y el rebaje. El primer aspecto de la invención proporciona también un método para fabricar una pala de turbina eólica, en el que el método comprende las etapas de: a) fabricar una carcasa aerodinámica que tiene un primer rebaje, fabricándose la carcasa aerodinámica de modo que comprende una primera parte engrosada en un primer lado del primer rebaje y una segunda parte engrosada en un segundo lado del primer rebaje, y de modo que el primer rebaje se ahúsa hacia el primer lado del rebaje y se ahúsa hacia el segundo lado del rebaje, b) fabricar una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón de larguero, fabricándose el primer cordón de larguero de modo que se ahúsa hacia un primer lado del cordón de larguero y se ahúsa adicionalmente hacia un segundo lado del cordón de larguero, c) disponer el primer cordón de larguero en el primer rebaje de la carcasa aerodinámica de modo que el primer lado del cordón de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al primer lado del rebaje, y el segundo lado del cordón de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al segundo lado del rebaje, y d) conectar el primer cordón de larguero a la carcasa aerodinámica. Ventajosamente, en la etapa d), el primer cordón de larguero se pega a la carcasa aerodinámica.

25 Según un segundo aspecto, que puede usarse en conexión con el primer aspecto, la invención proporciona una pala de turbina eólica que comprende: una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón de larguero, y en la que el primer cordón de larguero se prefabrica como un objeto reforzado con fibra que comprende un primer material de refuerzo de fibra y un primer material de matriz, y una carcasa aerodinámica hecha de un material reforzado con fibra que comprende un segundo material de refuerzo de fibra y un segundo material de matriz, en la que la estructura portadora de carga se conecta a la carcasa aerodinámica, y en la que el segundo material de matriz es un poliéster o viniléster, y el primer material de matriz es un material de polímero distinto de poliéster o viniléster. La carcasa aerodinámica es una carcasa fina que define el contorno exterior de la pala de turbina eólica y, por consiguiente, la forma aerodinámica de la pala.

30 El segundo material de matriz puede ser ventajosamente una resina a base de epoxi. En una realización, el segundo material de matriz (por ejemplo, la resina a base de epoxi) es una resina de curado por calor en oposición a una que cura mediante una reacción química catalítica, por ejemplo, produciendo calor exotérmico. La resina de curado por calor puede ser ventajosamente una resina termoendurecible, pero también puede ser en principio un termoplástico.

35 Por tanto, según una realización altamente ventajosa, la carcasa se fabrica por medio de una resina que cura mediante una reacción química catalítica, por ejemplo, una reacción química exotérmica. Por otro lado, el cordón de larguero se fabrica y se cura por medio de una resina activada por calor, tal como un epoxi. De ese modo, la carcasa aerodinámica puede fabricarse por medio de materiales y moldes relativamente baratos, mientras que el cordón de larguero puede fabricarse en materiales de matriz y moldes calentados que tienen ventajas, entre otras, con respecto a contracción (llevando a su vez a menos arrugas en el laminado), propiedades eléctricas y resistencias mecánica y a la fatiga. Además, la fabricación de la carcasa y la fabricación de la estructura portadora de carga crítica son independientes entre sí, lo que significa que es más fácil tener el control sobre la fabricación de las estructuras individuales. Por tanto, se establece un enfoque de fabricación optimizado de coste para fabricar la carcasa de pala, al tiempo que se aseguran propiedades mecánicas optimizadas para la parte más crítica de la estructura portadora de carga de la pala, concretamente el cordón de larguero. Además, el cordón de larguero puede fabricarse por medio de un molde mucho más estrecho. Por tanto, si es necesario, pueden llevarse a cabo reparaciones posteriores más fácilmente sin tener que caminar sobre el material de refuerzo de fibra.

40 Según una realización ventajosa, el primer material de matriz es una resina a base de epoxi. Según otra realización ventajosa, el primer material de refuerzo de fibra comprende fibras de carbono. De ese modo, la estructura portadora de carga puede hacerse relativamente rígida en comparación con el peso y la cantidad de material de refuerzo de fibra usado para la estructura portadora de carga. Por tanto, la pala puede hacerse más ligera y/o menos elástica, reduciendo de ese modo momentos transferidos al buje y al resto de la turbina eólica, así como reduciendo el riesgo de que la palas se desvíen hasta un grado, donde pueden colisionar con la torre de la turbina eólica durante la rotación del rotor. Además, las fibras de carbono son compatibles con resinas de epoxi, proporcionando, por tanto, una buena unión mecánica en el material de matriz. En general, el uso de fibras de carbono hace factible fabricar palas más largas o más ligeras en comparación con, por ejemplo, palas reforzadas con fibra de vidrio sin flexionar previamente las palas para curvarlas alejándolas de la torre en su estado no tensionado.

Es evidente que la pala de turbina eólica está formada como una estructura alargada que tiene una dirección longitudinal. Tanto la carcasa aerodinámica como la estructura portadora de carga se forman también, por tanto, como estructuras alargadas conectadas entre sí a lo largo de una superficie de conexión que se extiende en la dirección longitudinal de la pala.

5 La carcasa aerodinámica puede formarse ventajosamente como una carcasa fina o relativamente fina.

10 El primer material de refuerzo de fibra puede estar sustancialmente compuesto de fibras de carbono. Sin embargo, el cordón de larguero también puede comprender mallados híbridos que comprende tanto fibras de carbono como fibras de vidrio. Según una realización ventajosa, las fibras de refuerzo del cordón de larguero comprenden al menos el 25%, o al menos el 30%, o al menos el 35%, o al menos el 40%, o al menos el 50%, o al menos el 60%, o al menos el 70%, o al menos el 80%, o al menos el 90% de fibras de carbono. Las fibras de refuerzo incluso pueden constituirse totalmente por fibras de carbono. En una realización ventajosa, se usan mallados híbridos que comprenden tanto fibras de vidrio como fibras de carbono, en los que aproximadamente el 35% por volumen de la cantidad total de fibras son fibras de carbono.

15 Según una realización, el segundo material de refuerzo de fibra es fibras de vidrio. Fibras de vidrio son compatibles con resinas a base de poliéster, mejorando, por tanto, una buena unión mecánica en el material de matriz. Por consiguiente, la carcasa aerodinámica puede hacerse a partir de materiales relativamente baratos en comparación con, por ejemplo, fibras de carbono y resinas a base de epoxi.

20 Según una realización altamente ventajosa, una superficie externa de la carcasa aerodinámica está revestida con un recubrimiento de gel. Los recubrimientos de gel pueden aplicarse fácilmente a compuestos a base de poliéster o viniléster, dado que el poliéster y el viniléster pueden unirse químicamente con el estireno del recubrimiento de gel. De ese modo, la carcasa aerodinámica que comprende una resina a base de poliéster o viniléster como material de matriz tiene la ventaja de que el recubrimiento de gel puede aplicarse a la superficie externa de la carcasa durante la fabricación de la carcasa, por ejemplo, aplicando el recubrimiento de gel a la superficie de molde antes de disponer en capas el material de refuerzo de fibra. De ese modo, diversas operaciones posmoldeo, tales como pintar la pala, pueden evitarse, mediante lo cual el procedimiento de fabricación puede simplificarse y los costes pueden reducirse.

Por tanto, se observa que la combinación de cordones de larguero reforzados con fibra de carbono conectados a una carcasa aerodinámica ventajosamente fina hecha de poliéster reforzado con fibra de vidrio y cubierta por un recubrimiento de gel proporciona la posibilidad de fabricar palas relativamente rígidas y más largas, mientras que las operaciones posmoldeo se simplifican.

30 Según una realización, el primer cordón de larguero se adhiere a la carcasa aerodinámica, ventajosamente, mediante un adhesivo a base de epoxi.

35 Según otra realización, la estructura portadora de carga comprende además un segundo cordón de larguero. En una realización ventajosa, el primer cordón de larguero y el segundo cordón de larguero se conectan por medio de al menos una primera alma de cizalladura, ventajosamente también una segunda alma de cizalladura. La primera alma de cizalladura y/o la segunda alma de cizalladura puede ser ventajosamente un alma en forma de C o un alma en forma de I. Por tanto, es evidente que los cordones de larguero y almas pueden fabricarse de manera independiente y luego conectarse más adelante entre sí, por ejemplo, pegando las partes entre sí, con el fin de formar la estructura portadora de carga. La carcasa aerodinámica puede conectarse entonces más adelante a la estructura portadora de carga.

40 Según otra realización más, la carcasa aerodinámica está hecha de al menos una primera parte de carcasa, por ejemplo, una parte de carcasa de lado de succión, y una segunda parte de carcasa, por ejemplo, una parte de carcasa de lado de presión. La primera parte de carcasa y la segunda parte de carcasa pueden, por ejemplo, conectarse entre sí a lo largo de líneas de unión a lo largo de un borde de ataque y un borde de fuga de la pala de turbina eólica.

45 Es posible fabricar los primeros cordones de larguero de manera independiente y conectándolos o adhiriéndolos a las partes de carcasa. Por tanto, el primer cordón de larguero puede conectarse a la primera parte de carcasa, y el segundo cordón de larguero puede conectarse a la segunda parte de carcasa. Después, las partes de carcasa que comprenden los cordones de larguero pueden adherirse entre sí con las almas de cizalladura dispuestas entre los cordones de larguero.

50 En una realización alternativa, la estructura portadora de carga es un larguero o una viga. Esto proporciona una realización alternativa, en la que la estructura portadora de carga puede formarse como una sola estructura solidaria, por ejemplo, un larguero cilíndrico en forma de caja o circular, y la carcasa aerodinámica fina se adhiere después a la estructura portadora de carga.

55 El segundo aspecto de la invención proporciona también un método para fabricar una pala de turbina eólica, en el que el método comprende las etapas de: a) fabricar una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón de larguero como un objeto reforzado con fibra que comprende un primer material de refuerzo de fibra y un primer material de matriz, b) fabricar una carcasa aerodinámica como un material de refuerzo de fibra que comprende un segundo material de refuerzo de fibra y un segundo material de matriz, y c) conectar la estructura portadora de

carga a la carcasa aerodinámica, en la que el segundo material de matriz es un poliéster o viniléster, y el primer material de matriz es un material de polímero distinto de poliéster o viniléster.

5 Según una realización ventajosa del método, la etapa a) incluye la etapa de suministrar y curar la primera resina con el fin de formar la estructura portadora de carga. En otra realización ventajosa, la etapa b) incluye la etapa de suministrar y curar el poliéster o viniléster con el fin de formar la carcasa aerodinámica. En otra realización más ventajosa aún, la etapa c) comprende la etapa de adherir la estructura portadora de carga a la carcasa aerodinámica, por ejemplo, por medio de un adhesivo a base de epoxi.

10 El primer cordón de larguero y/o la carcasa aerodinámica pueden fabricarse ventajosamente por medio de un procedimiento de moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM). La carcasa aerodinámica puede fabricarse en una primera parte de molde. El primer cordón de larguero puede fabricarse en una segunda parte de molde. Si la carcasa aerodinámica se fabrica como partes de carcasa independientes, tales como una parte de carcasa de lado de presión y una parte de carcasa de lado de succión que se adhieren más adelante entre sí a lo largo del borde de ataque y el borde de fuga de la pala, las partes de carcasa independientes pueden fabricarse, naturalmente, en primeras partes de molde independientes.

15 Además, es evidente que las diversas estructuras compuestas en un método de VARTM pueden usar una estructura de molde que comprende una parte de molde rígida y una bolsa de vacío sellada a la parte de molde rígida con el fin de formar una cavidad de molde entre las mismas. El material de refuerzo de fibra se dispone en la cavidad de molde, y el material de matriz, es decir la resina, se suministra a la cavidad de molde.

20 La resina puede proporcionarse o bien en combinación con el material de refuerzo de fibra o bien con preimpregnados. Alternativamente, el material de refuerzo de fibra puede disponerse en forma seca y la resina suministrarse después. También es posible usar una combinación de preimpregnados y resina adicional suministrados al material de refuerzo de fibra para mejorar el humedecimiento.

25 En una realización, la etapa a) comprende además la etapa de fabricar un segundo cordón de larguero, así como una o más almas de cizalladura y conectar dicha una o más almas de cizalladura entre el primer cordón de larguero y el segundo cordón de larguero. En otra realización, la etapa b) incluye la etapa de proporcionar un recubrimiento de gel a una superficie externa de la carcasa aerodinámica.

Normalmente, el recubrimiento de gel se aplicará a la superficie de formación del molde antes de que el material de refuerzo de fibra se disponga en capas en el molde.

30 Según un tercer aspecto, la invención proporciona también un cordón de larguero prefabricado para conectar a una carcasa aerodinámica, comprendiendo el cordón de larguero una estructura alargada orientada a lo largo de un eje longitudinal y que tiene una primera superficie para conectar a una carcasa aerodinámica, una segunda superficie que se orienta opuesta a la primera superficie, un primer lado, y un segundo lado opuesto al primer lado, en el que el cordón de larguero comprende un laminado principal que comprende un número de capas de refuerzo de fibra entre la primera superficie y la segunda superficie y encastradas en una matriz de polímero, y en la que el cordón de larguero comprende además un primer material de núcleo intercalado en el primer lado del cordón de larguero y contiguo al laminado principal, ahusándose el primer material de núcleo intercalado en un sentido hacia el laminado principal para proporcionar una transición gradual entre el primer material de núcleo y el laminado principal.

35 Este cordón de larguero prefabricado proporciona una transición de rigidez y una transición de tensión mejoradas, cuando se une a una carcasa aerodinámica. Esto en particular se refiere a unión a carcasas aerodinámicas que tienen una construcción intercalada con un material de núcleo intercalado, por ejemplo, juntando el cordón de larguero prefabricado en la pala de turbina eólica final.

40 El primer material de núcleo intercalado puede intercalarse entre un revestimiento interno y externo. Los términos "interno" y "externo" han de entenderse en relación con la pala de turbina eólica terminada. Por tanto, el revestimiento interno es el lado que se orienta hacia el interior de la pala cuando se une a la carcasa aerodinámica, mientras que el revestimiento externo es el lado que se orienta hacia la carcasa aerodinámica.

45 Según una realización ventajosa, el cordón de larguero prefabricado puede comprender además un segundo material de núcleo intercalado en el segundo lado del cordón de larguero y que se junta al laminado principal, ahusándose el segundo material de núcleo intercalado en un sentido hacia el laminado principal para proporcionar una transición gradual entre el segundo material de núcleo y el laminado principal. Por consiguiente, se observa que el cordón de larguero puede fabricarse con un laminado principal dispuesto centralmente y un material de núcleo intercalado en ambos lados del cordón de larguero.

Por laminado principal se entiende una inserción de fibra que comprende preferiblemente una pluralidad de capas de refuerzo de fibra que forman una estructura portadora de carga de la pala de turbina eólica terminada.

55 El primer material de núcleo puede ahusarse adicionalmente hacia el primer lado del cordón de larguero. El segundo material de núcleo puede ahusarse también hacia el segundo lado del cordón de larguero. Por tanto, se observa que material de núcleo puede tener forma en sección transversal como una cuña o una cuña doble.

5 El laminado principal puede ahusarse también hacia el primer lado y/o el segundo lado. Esto puede lograrse, por ejemplo, dejando que los bordes de lado de las capas de refuerzo de fibra se desplacen mutuamente y/o dejando que la anchura de las diversas capas varíe a través del grosor del laminado principal. Esto proporciona una realización ventajosa particular, en la que se logra una transición de rigidez gradual entre el material de núcleo intercalado y el laminado principal. Además, los lados de las capas individuales pueden ahusarse o chaflanarse.

El material de núcleo intercalado puede ser, por ejemplo, madera de balsa o un polímero espumado.

10 La transición entre el laminado principal y el primer material de núcleo intercalado y/o el segundo material de núcleo intercalado puede inclinarse en un ángulo de ahusamiento de 10 a 80 grados. El término prefabricado significa que el cordón de larguero se fabrica de manera independiente antes de conectarse, por ejemplo, mediante adhesión, a la carcasa aerodinámica. El cordón de larguero prefabricado se precura. Según un cuarto aspecto, la invención proporciona un método para fabricar la carcasa aerodinámica mencionada anteriormente con un rebaje. Por consiguiente, la invención proporciona un método para fabricar una parte de carcasa aerodinámica para una turbina eólica, comprendiendo la parte de carcasa aerodinámica un rebaje para la disposición y conexión de un cordón de larguero dentro de dicho rebaje, comprendiendo dicho método las etapas de: a) proporcionar una primera parte de molde que tiene una primera superficie de formación que define una parte de un exterior de la parte de carcasa aerodinámica, b) disponer en capas el material de refuerzo de fibra y opcionalmente también material de núcleo intercalado en el primer molde en la primera superficie de formación, c) disponer uno o más elementos de inserción que tienen una forma exterior correspondiente a al menos lados del rebaje de la parte de carcasa aerodinámica, d) suministrar resina a dicho material de refuerzo de fibra y material de núcleo intercalado opcional, e) curar o preconsolidar la resina, y f) retirar el uno o más elementos de inserción. En la etapa d), la resina puede suministrarse a los materiales de fibra por medio de preimpregnados, es decir de manera simultánea con la disposición en capas del material de refuerzo de fibra, o suministrarse después. También es posible usar una combinación de preimpregnados y resina adicional suministrada al material de fibra. La resina se cura preferiblemente antes de que el uno o más elementos de inserción se retiren dejando una impresión o rebaje en la parte de carcasa aerodinámica.

15 Este método de fabricación proporciona un modo simple de formar la carcasa aerodinámica con un rebaje en la posición correcta y para conectar el cordón de larguero en la posición correcta a la carcasa de pala. Además, el elemento de inserción asegura que el material de fibra y el material de núcleo intercalado no se deslice hacia abajo desde los lados del molde y cause arrugas en la disposición en capas.

20 El uno o más elementos de inserción pueden tener forma, por ejemplo, como un modelo que corresponde a al menos una forma exterior del cordón de larguero, que va a insertarse y conectarse al rebaje. Esto proporciona un modo simple de asegurar que la forma del rebaje corresponde sustancialmente a la forma del cordón de larguero.

Por consiguiente, el uno o más elementos de inserción tienen una forma exterior que corresponde al menos a una superficie externa del cordón de larguero.

25 El elemento de inserción de modelo puede formarse como un solo elemento que corresponde a todo el rebaje. Alternativamente, puede estar compuesto por un número de elementos de inserción independientes que forman cada uno una sección longitudinal independiente del rebaje. Por consiguiente, el uno o más elementos de inserción pueden comprender un primer elemento de inserción que forma al menos una parte de un primer lado del rebaje, y un segundo elemento de inserción que forma al menos una parte de un segundo lado del rebaje. Similar al modelo, el primer elemento de inserción y el segundo elemento de inserción pueden formar todo el primer lado y el segundo lado del rebaje, respectivamente. Alternativamente, pueden formarse por un número de primeros elementos de inserción de lado y segundos elementos de inserción de lado, que forman cada uno una sección longitudinal del primer lado y el segundo lado del rebaje, respectivamente. Los elementos de inserción individuales pueden ser también independientes en la sección longitudinal con un espaciamiento mutuo, estando, por tanto, solamente dispuestos a lo largo de partes del rebaje. En una realización de este tipo, las partes individuales siguen sirviendo para asegurar que la posición del rebaje está formada de manera muy precisa y para asegurar que el material de fibra y las partes de núcleo intercaladas no se deslizan hacia abajo desde los lados de la superficie de moldeo.

Ventajosamente, un material de desprendimiento, tal como una sustancia cerosa, se aplica a dicho uno o más elementos de inserción con el fin de impedir que dicho uno o más elementos de inserción se adhieran al material de la carcasa aerodinámica.

30 Tal como se mencionó anteriormente, el método puede comprender el uso de infusión de vacío, tal como moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM.)

En una realización, se aplica una bolsa de vacío en el material de refuerzo de fibra y el material de núcleo intercalado opcional, así como uno o más elementos de inserción y se sellan a la primera parte de molde.

35 Por tanto, se forma una cavidad de molde entre la primera parte de molde, ventajosamente rígida, y la primera bolsa de vacío. El material de refuerzo de fibra, el material de núcleo intercalado opcional, y el uno o más elementos de inserción se disponen, por tanto, en la cavidad de molde. La cavidad de molde se une a una fuente de vacío que, en primer lugar, evacúa la cavidad de molde. De ese modo, el material dispuesto en la cavidad de molde se comprime debido a las fuerzas aplicadas desde la bolsa de vacío. Esto asegura también que el uno o más elementos de inserción

se presionan contra el material de refuerzo de fibra, proporcionando de ese modo una impresión según el rebaje pretendido.

5 En otra realización, se aplica una primera bolsa de vacío en el material de refuerzo de fibra y el material de núcleo intercalado opcional, y en la que el uno o más elementos de inserción se disponen en la parte superior de la primera bolsa de vacío, y en la que una segunda bolsa de vacío se dispone en la parte superior del uno o más elementos de inserción.

10 Las bolsas de vacío primera y segunda se sellan con el fin de formar una primera cavidad de molde y una segunda cavidad de molde. Las dos cavidades de molde se evacúan en primer lugar. Luego, la resina se hace fluir y/o se inyecta al interior de la primera cavidad de molde, humedeciendo de ese modo el material de fibra. Después, la resina se cura o se consolida previamente, y los elementos de inserción pueden retirarse junto con las bolsas de vacío. Esta realización tiene la ventaja de una retirada fácil de los elementos de inserción sin tener que aplicar un material de desprendimiento o recubrimiento al uno o más elementos de inserción.

15 Es evidente que el producto intermedio del cordón de larguero dotado de rebordes o alas es nuevo e inventivo en sí mismo. Por tanto, según un quinto aspecto, la invención proporciona un cordón de larguero prefabricado para conectar a una carcasa aerodinámica, el cordón de larguero que comprende una estructura alargada orientada a lo largo de un eje longitudinal y que tiene una primera superficie para conectar a una carcasa aerodinámica, una segunda superficie que se orienta opuesta a la primera superficie, un primer lado, un segundo lado opuesto al primer lado, en el que el primer cordón de larguero comprende un primer reborde dispuesto a lo largo del primer lado del primer cordón de larguero, y un segundo reborde dispuesto a lo largo del segundo lado del primer cordón de larguero.

20 El primer reborde y el segundo reborde están formados como salientes que se extienden desde y a lo largo del primer lado y el segundo lado del primer cordón de larguero. El primer reborde y el segundo reborde pueden formarse como estructuras reforzadas con fibra.

25 Es evidente que los aspectos mencionados anteriormente de la invención pueden combinarse de cualquier modo y están relacionados por el aspecto común de separar la fabricación de la carcasa aerodinámica y la estructura portadora de carga. También es evidente que las realizaciones tercera, cuarta y quinta están relacionadas además por un concepto inventivo común de formar una pala proporcionando un rebaje en la carcasa aerodinámica para la inserción y unión de un cordón de larguero, así como productos intermedios particularmente adecuados para un diseño de este tipo.

30 Es evidente que la invención es particularmente adecuada para estructuras grandes. Por consiguiente, la invención preferiblemente se refiere a palas de turbina eólica, así como estructuras intermedias que tienen una longitud total de al menos 30 metros, 40 metros, 45 metros o 50 metros.

La invención contempla también una pala de turbina eólica que comprende un número de palas, por ejemplo, dos o tres, según cualquiera de los aspectos y realizaciones mencionados anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

35 La invención se explica en detalle a continuación con referencia a una realización mostrada en los dibujos, en los que la figura 1 muestra una turbina eólica,
la figura 2 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica según la invención,
la figura 3 muestra una parte de carcasa aerodinámica y un cordón de larguero dispuesto en un molde,
la figura 4 muestra una primera realización para fabricar una parte de carcasa aerodinámica según la invención,
40 la figura 5 muestra una segunda realización para fabricar una parte de carcasa aerodinámica según la invención,
la figura 6 muestra una realización para fabricar cordón de larguero según la invención,
la figura 7 muestra una primera realización de un cordón de larguero según la invención,
las figuras 8a y 8b muestran una segunda y tercera realización de un cordón de larguero según la invención, y
la figura 9 muestra otra realización para fabricar una pala de turbina eólica según la invención,
45 la figura 10 muestra una primera realización de un conjunto de partes para fabricar una parte de carcasa aerodinámica,
la figura 11 muestra una segunda realización de un conjunto de partes para fabricar una parte de carcasa aerodinámica,
la figura 12 muestra una tercera realización de un conjunto de partes para fabricar una parte de carcasa aerodinámica,
y

la figura 13 muestra una cuarta realización de un conjunto de partes para fabricar una parte de carcasa aerodinámica.

Descripción detallada de la invención

5 La figura 1 ilustra una turbina eólica a barlovento moderna convencional según el denominado "concepto danés" con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un árbol de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un buje 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el buje 8, teniendo cada una raíz 16 de pala lo más cercana al buje y una punta 14 de pala lo más alejada desde el buje 8. El rotor tiene un radio indicado como R.

10 La figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala 10 de turbina eólica según la invención. La pala 10 de turbina eólica tiene la forma de una pala de turbina eólica convencional y comprende una región 30 de raíz lo más próxima al buje, una región 34 perfilada o de superficie aerodinámica lo más alejada desde el buje y una región 32 de transición entre la región 30 de raíz y la región 34 de superficie aerodinámica. La pala 10 comprende un borde 18 de ataque que se orienta hacia el sentido de rotación de la pala 10, cuando la pala se monta en el buje, y un borde 20 de fuga que se orienta hacia el sentido opuesto del borde 18 de ataque.

15 La región 34 de superficie aerodinámica (también denominada la región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de elevación, mientras que la región 30 de raíz debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, que, por ejemplo, hace más fácil y más seguro montar la pala 10 al buje. El diámetro (o la cuerda) de la región 30 de raíz puede ser constante a lo largo de toda la zona 30 de raíz. La región 32 de transición tiene un perfil de transición que cambia gradualmente desde la forma circular o elíptica de la región 30 de raíz hasta el perfil de superficie aerodinámica de la región 34 de superficie aerodinámica. La longitud de cuerda de la región 32 de transición aumenta normalmente al aumentar la distancia r desde el buje. La región 34 de superficie aerodinámica tiene un perfil de superficie aerodinámica con una cuerda que se extiende entre el borde 18 de ataque y el borde 20 de fuga de la pala 10. La anchura de la cuerda disminuye al aumentar la distancia r desde el buje.

20 Un resalto 40 de la pala 10 se define como la posición en la que la pala 10 tiene su mayor longitud de cuerda. El resalto 40 se proporciona normalmente en el límite entre la región 32 de transición y la región 34 de superficie aerodinámica.

25 Ha de observarse que las cuerdas de diferentes secciones de la pala normalmente no descansan en un plano común, dado que la pala puede torcerse y/o curvarse (es decir, flexionarse de manera preliminar), dotando por tanto el plano de cuerda con un curso torcido y/o curvado de manera correspondiente, siendo este el caso más frecuente con el fin de compensar la velocidad local de la pala que depende del radio desde el buje.

30 La pala se hace normalmente a partir de una parte 36 de carcasa de lado de presión y una parte 38 de carcasa de lado de succión que se pegan entre sí a lo largo de líneas de unión en el borde 18 de ataque y el borde de fuga de la pala 20.

35 La figura 3 muestra una vista en sección transversal a través de una primera parte 150 de molde para su uso en un método para fabricar una pala de turbina eólica. La primera parte 150 de molde comprende una primera superficie de moldeo, que define una superficie externa de la pala de turbina eólica terminada, mostrada en este caso como el lado de presión de la pala.

40 Un número de primeras capas de fibra, partes de núcleo y secciones de refuerzo se disponen en la superficie de formación, incluyéndose estas partes en una primera parte 136 de carcasa aerodinámica (o parte de carcasa de lado de presión) de la pala de turbina eólica. La parte 136 de carcasa aerodinámica puede fabricarse, por ejemplo, aplicando en primer lugar una sustancia cerosa a la superficie de moldeo con el fin de poder retirar la parte de carcasa tras el moldeo. Luego, puede aplicarse un recubrimiento de gel a la superficie tras un número de capas 178 de revestimiento externas, por ejemplo, hechas de capas de fibras de vidrio, se disponen en el molde. Un primer material 182 de núcleo intercalado intermedio y un segundo material 184 de núcleo intercalado intermedio, tal como madera de balsa, se disponen en la parte superior de las capas 178 de revestimiento externas con el fin de formar una primera parte 172 engrosada y una segunda parte 174 engrosada de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica, respectivamente.

45 De hecho, un primer rebaje 176 está formado entre las dos partes 172, 174 engrosadas. Posteriormente, un número de capas 180 de revestimiento internas, por ejemplo, fibras de vidrio, se disponen en la parte superior de las capas 178 de revestimiento externas y el material 182, 184 de núcleo intercalado intermedio primero y segundo. Además, un número de capas de fibra, por ejemplo, fibras de vidrio, puede intercalarse entre las capas 178 de revestimiento externas y las capas 180 de revestimiento internas con el fin de formar un refuerzo 192 de borde de ataque y/o un refuerzo 194 de borde de fuga.

50 Finalmente, se aplica una bolsa de vacío (no mostrada) en la parte superior del material de fibra y el material intercalado y se sella contra la primera parte 150 de forma con el fin de formar una cavidad de molde entre la primera parte 150 de molde y la bolsa de vacío. La cavidad de molde se evacúa luego mediante el uso de una fuente de vacío (no mostrada) y se suministra resina a la cavidad de molde por medio de entradas de resina (no mostradas) con el fin de humedecer totalmente el material de fibra. Finalmente, la resina se cura con el fin de formar la primera parte 136 de carcasa aerodinámica.

Después de que se haya fabricado la primera parte 136 de carcasa aerodinámica, se dispone un primer cordón 160 de larguero prefabricado en el primer rebaje 176 de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica. El primer cordón 160 de larguero prefabricado puede haberse fabricado ventajosamente con un primer reborde o ala 166 que sobresale desde un primer lado 162 del primer cordón 160 de larguero y un segundo reborde o ala 168 que sobresale desde un segundo lado 164 del primer cordón 160 de larguero. La primera ala 166 y la segunda ala 168 se ponen a tope contra superficies internas de la primera parte 172 engrosada y la segunda parte 174 engrosada de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica, respectivamente. El primer cordón 160 de larguero y las alas 166, 168 primera y segunda pueden dimensionarse ventajosamente de modo que se cree una pequeña cavidad 186 entre el primer cordón 160 de larguero y la superficie interna del rebaje 176. Un adhesivo, tal como un pegamento a base de epoxi, puede haberse aplicado a la superficie del rebaje 176 antes de disponer el primer cordón 160 de larguero en el rebaje 176. Alternativamente, el adhesivo puede inyectarse al interior de la cavidad y luego curarse, con el fin de unir el primer cordón 160 de larguero al rebaje 176 de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica. Las alas 166, 168 pueden actuar como una barrera de pegamento de modo que solamente pueda inyectarse el pegamento necesario al interior de la cavidad o que pueda retirarse el exceso de pegamento inyectando pegamento desde un extremo longitudinal de la cavidad 186 y recogiendo dicho exceso de pegamento en un segundo extremo de la cavidad. Es evidente que las alas 166, 168 no tienen que extenderse necesariamente a lo largo de toda la extensión longitudinal del cordón de larguero sino solamente es necesario que se sitúen en diversas secciones del cordón de larguero.

El primer cordón 160 de larguero se extiende en una dirección longitudinal de la pala y forma una estructura portadora de carga de la pala terminada.

Tal como se muestra en la figura 3, los lados de la primera parte 182 engrosada y la segunda parte 184 engrosada de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica se ahúsan hacia el primer rebaje 176. De manera equivalente, el grosor del cordón 160 de larguero se ahúsa hacia el primer lado 162 y el segundo lado 164 del cordón 160 de larguero. Preferiblemente, el rebaje 176 y el cordón 160 de larguero se forman de modo que lados de los mismos se ponen a tope sustancialmente uno contra otro de modo que se obtiene una transición gradual entre las dos estructuras.

También es evidente que el cordón 160 de larguero puede proporcionarse sin las alas 166, 168. La cavidad entre el cordón de larguero y el rebaje puede seguir formándose por los lados ahusados del cordón de larguero y el rebaje, por ejemplo, haciendo la superficie inferior del cordón de larguero ligeramente más ancha que la superficie inferior del rebaje.

La figura 3 se ha descrito con respecto a una parte 136 de carcasa de lado de presión y un primer cordón 160 de larguero. De manera equivalente, una parte de carcasa de lado de succión, así como un segundo cordón de larguero se fabrican de manera independiente y se unen mediante adhesión entre sí. La carcasa de lado de succión comprende también un rebaje, y el segundo cordón de larguero se dispone en el rebaje de la parte de carcasa de lado de succión. Las dos partes de carcasa (con cordones de larguero unidos) se conectan entonces entre sí, por ejemplo, formando líneas de unión a lo largo del borde de ataque y el borde de fuga de las partes de carcasa y adhiriéndolas entre sí. Además, pueden disponerse almas de cizalladura entre los cordones de larguero en forma de, por ejemplo, almas en forma de I o en forma de C. En esta configuración, los cordones de larguero se adhieren entonces a las partes de carcasa antes de unir las almas de cizalladura.

La resina para formar la parte de carcasa aerodinámica es preferiblemente una resina a base de viniléster o poliéster, dado que esta permite el uso de un recubrimiento de gel, mediante lo cual puede evitarse un número de operaciones posmoldeo, tales como pintar.

La figura 4 ilustra un primer método para formar el primer rebaje 176 de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica. En esta realización, un elemento 190 de inserción modelo se dispone entre las dos partes 172, 174 engrosadas. El elemento de inserción modelo tiene sustancialmente una forma que corresponde a la del primer cordón 160 de larguero. Preferiblemente, el elemento de inserción modelo es ligeramente mayor que el cordón 160 de larguero con el fin de asegurar que el cordón 160 de larguero pueda encajar, de hecho, después en el rebaje 176. Cuando se fabrica la primera parte 136 de carcasa aerodinámica, se aplica una bolsa de vacío en la parte superior del material de fibra, el material de núcleo intercalado y el elemento 190 de inserción modelo. Aplicando un vacío a la cavidad de vacío formada entre la bolsa 188 de vacío y la primera parte 150 de molde, el elemento 190 de inserción modelo se presiona contra el material de fibra, dejando por tanto la impresión deseada. Al usar el elemento 190 de inserción modelo se asegura que el rebaje 176 se alinee apropiadamente y que el material de fibra y el material de núcleo intercalado no se deslicen hacia abajo durante la disposición en capas. El elemento 190 de inserción modelo se retira, naturalmente, después y antes de unir el primer cordón 160 de larguero.

La figura 5 ilustra un segundo método para formar el primer rebaje 176 de la primera parte 136 de carcasa aerodinámica. En esta realización, un primer elemento 196 de inserción de lado y un segundo elemento 198 de inserción de lado se usan, en su lugar, para formar un primer lado y un segundo lado del primer rebaje 176, respectivamente. La primera parte de carcasa aerodinámica puede fabricarse, tal como se describe en relación con las otras realizaciones, por medio de un moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) disponiendo una bolsa de vacío en la parte superior del material de fibra, el material de núcleo intercalado y elementos de inserción de lado. Las figuras 10-13 muestran diversas realizaciones de conjuntos de partes para fabricar una parte de carcasa aerodinámica según la invención.

5 Las figuras 10a-c muestran una primera realización del conjunto de partes según la invención. El conjunto de partes comprende una primera parte 250 de molde y un número de elementos 290 de inserción de moldeo. Los elementos 290 de inserción de moldeo están dotados de pasadores 291 de guía, que pueden engancharse mecánicamente con orificios 252 proporcionados en la primera superficie de formación de la primera parte 250 de molde. Después de que las capas de fibra que forman capas de revestimiento de la carcasa aerodinámica se hayan dispuesto en capas, los elementos 290 de inserción de moldeo, tal como se muestra en las figuras 10b y 10c, se unen a la primera parte de molde insertando los pasadores 291 de guía de los elementos 290 de inserción de moldeo en el interior de los orificios 252 de la primera parte 250 de molde. Posteriormente, las partes restantes que completan la carcasa aerodinámica pueden disponerse en la primera superficie de formación de la primera parte 250 de molde. Los elementos 290 de inserción de moldeo funcionan para sostener el material en los lados de la parte 250 de molde de manera que dicho material no se deslice hacia abajo ni provoque arrugas en la estructura terminada. Además, funcionan para controlar de manera muy precisa la posición del rebaje en la parte de carcasa aerodinámica terminada. Los elementos 290 de inserción de moldeo pueden proporcionarse, tal como se muestra en la figura 10a, como módulos independientes, que se extienden cada uno a lo largo de diferentes partes longitudinales del rebaje. El elemento de inserción modelo puede disponerse también con un espaciamiento mutuo tal como se muestra en la figura 10a.

20 Las figuras 11a-c muestran una segunda realización del conjunto de partes según la invención. La segunda realización es similar a la primera realización, y numerales semejantes se refieren a partes semejantes. Sin embargo, en esta realización, un número de primeros elementos 296 de inserción de lado y segundos elementos 298 de inserción de elemento de inserción puede unirse a la superficie de formación por medio de vástagos 293 o pasadores de guiado para enganchar orificios en la superficie de formación de la primera parte 250' de molde.

25 La figura 12 muestra una vista en perspectiva de una tercera realización del conjunto de partes según la invención. La tercera realización es similar a la primera realización, y numerales semejantes se refieren a partes semejantes. La tercera realización difiere de la primera realización en que los elementos 390 de inserción seccionados juntados entre sí de modo que juntos corresponden a todo el rebaje en la parte de carcasa aerodinámica terminada. En la realización mostrada, los elementos de inserción solamente tienen una forma correspondiente a la parte inferior del cordón de larguero que ha de insertarse en el interior de la parte de carcasa aerodinámica. Sin embargo, pueden emplearse diversas formas. Naturalmente, también es posible utilizar una combinación de las realizaciones primera y tercera dejando que algunos elementos de inserción se junten entre sí y otros elementos de inserción se dispongan con un espaciamiento mutuo entre ellos.

30 La figura 13 muestra una vista en perspectiva de una cuarta realización del conjunto de partes según la invención, que es similar a la segunda realización, y en la que numerales semejantes se refieren a partes semejantes. La cuarta realización difiere en que primeros elementos 396 de inserción de lado individuales se disponen para juntarse entre sí y formar juntos el primer lado del rebaje, mientras que segundos elementos 398 de inserción de lado individuales se disponen para juntarse entre sí y formar juntos el segundo lado del rebaje.

Los orificios en la superficie de formación de las realizaciones primera a cuarta pueden dotarse de una bomba de vacío para aplicar vacío, cuando se aplica vacío a la cavidad de molde. Los orificios pueden dotarse de una válvula, que puede cerrarse cuando se inyecta más tarde resina al interior de la cavidad de molde. Las válvulas pueden volver a abrirse tras el curado de modo que los elementos de inserción puedan retirarse de nuevo fácilmente.

40 Los elementos de inserción pueden hacerse de material de aluminio o polipropileno, u otro material, al que no se adhiera la resina. Los elementos de inserción pueden tratarse con cera o un material antideslizante para la retirada fácil de los elementos de inserción.

45 El uso de orificios de guía dejará un orificio en la parte de carcasa aerodinámica. Sin embargo, este orificio se llenará con resina o adhesivo, cuando el cordón de larguero se inserte y se una más adelante a la parte de carcasa aerodinámica. Puede ser necesario llevar a cabo una ligera reparación tras el desmolde, por ejemplo, mediante el uso de una simple reparación con recubrimiento de gel.

50 Además, las secciones de elemento de inserción de las realizaciones mostradas en las figuras 10 y 11 pueden conectarse mediante un material flexible, por ejemplo, entre los lados de los elementos de inserción seccionados de modo que el material flexible junto con las secciones de elemento de inserción forma partes de lado continuas. Estas partes de lado continuas pueden ayudar a proporcionar límites que ayudarán en la disposición en capas del material de fibra y el material de núcleo intercalado, facilitando de ese modo una posición muy precisa del rebaje. La unidad combinada con secciones de elemento de inserción y material flexible interconectado puede disponerse en el molde similar a listones que se sitúan en un armazón de lecho.

55 La figura 6 muestra una vista en sección transversal a través de una parte 161 de molde de cordón de larguero para su uso en un método para fabricar el primer cordón 160 de larguero. La parte 161 de molde de cordón de larguero comprende una superficie de formación que corresponde a la superficie externa del primer cordón 160 de larguero. Un número de capas de refuerzo de fibra (no mostradas) se disponen en la parte superior de la superficie de formación tras la cual se aplica una bolsa 163 de vacío en la parte superior de las capas de refuerzo de fibra con el fin de formar una cavidad 165 de molde entre la segunda parte 161 de molde ventajosamente rígida y la bolsa 163 de vacío. La

cavidad 165 de molde se evacúa luego mediante el uso de una fuente de vacío (no mostrada), tras lo cual se suministra resina a la cavidad 165 de molde por medio de entradas de resina (no mostradas) con el fin de humedecer el material de refuerzo de fibra. Finalmente, la resina se cura o al menos se consolida de manera preliminar con el fin de formar el primer cordón 160 de larguero prefabricado.

5 La figura 7 muestra una primera realización de un cordón de larguero según la invención. En esta realización, todo el cordón de larguero se constituye por un polímero reforzado con fibra, siendo ventajosamente fibras de carbono encastradas en un material de matriz de epoxi. De ese modo, toda la estructura de cordón de larguero constituye la estructura de soporte de carga (o laminado principal) conectada a la parte de carcasa aerodinámica de la pala.

10 La figura 8a muestra una segunda realización de un cordón de larguero según la invención. Esta realización difiere de la primera realización en que se proporciona un primer material 167 de núcleo intercalado en el primer lado 162 del cordón 160 de larguero, y se proporciona un segundo material de núcleo intercalado 169 en el segundo lado 164 del cordón de larguero. Por tanto, la parte central del cordón 160 de larguero que comprende una pluralidad de capas de refuerzo de fibra apiladas, que comprenden preferiblemente fibras de carbono, constituye la estructura portadora de carga (o laminado principal) conectada a la parte de carcasa aerodinámica de la pala. En una realización ventajosa, los materiales 167, 169 de núcleo intercalado primero y segundo son un polímero espumado. Esto proporciona la ventaja de que la madera de balsa de la parte engrosada de la carcasa aerodinámica puede aislarse eléctricamente de fibras de carbono del laminado principal del cordón de larguero. La parte engrosada de la carcasa aerodinámica también puede comprender un polímero espumado, al menos en la región más cercana al rebaje y el cordón de larguero, con el fin de asegurar el aislamiento eléctrico.

20 La figura 8b muestra una tercera realización de un cordón de larguero según la invención. Esta realización corresponde a la segunda realización en la que numerales de referencia semejantes se refieren a partes semejantes. La tercera realización difiere de la segunda realización en que el material 167', 169' de núcleo intercalado en los lados 162', 164' se ahúsan de modo que se extienden al interior del laminado principal con capas de fibra dispuestas tanto interiores con respecto a como exteriores con respecto al material ahusado.

25 La figura 9 muestra otra realización para fabricar una pala de turbina eólica según la invención. Esta realización corresponde a la realización descrita en relación con la figura 3, pero con la diferencia de que la estructura portadora de carga se ensambla antes de unirse a la primera parte de carcasa. Por consiguiente, la estructura portadora de carga que comprende el primer cordón 160 de larguero, un segundo cordón 260 de larguero, así como una primera alma 197 de cizalladura y una segunda alma 199 de cizalladura se ensambla de manera independiente antes de adherirse a la primera parte de carcasa aerodinámica. Posteriormente, la segunda parte de carcasa aerodinámica (no mostrada) se dispone en la parte superior de la estructura portadora de carga y la primera parte de carcasa aerodinámica de modo que el segundo cordón 260 de larguero se adhiere a un rebaje de la segunda parte de carcasa aerodinámica, y las partes de carcasa primera y segunda se adhieren entre sí a lo largo de líneas de unión en el borde de ataque y el borde de fuga de las partes de carcasa.

35 La invención se ha descrito con referencia a realizaciones ventajosas. Sin embargo, el alcance de la invención no está limitado a la realización ilustrada, y pueden llevarse a cabo alteraciones y modificaciones sin desviarse del alcance de la invención. La pala de turbina eólica se ha descrito, por ejemplo, solamente con un solo rebaje y cordón de larguero en cada lado de la pala. Sin embargo, en particular para palas muy grandes, la pala puede comprender estructuras portadoras de carga adicionales (o laminados principales). Por consiguiente, realizaciones que tienen una sección longitudinal, en las que la carcasa aerodinámica comprende dos o más rebajes en cada lado con cordones de larguero fabricados de manera independiente dispuestos en y unidos a los rebajes, también se contemplan por la invención. En la descripción, la unión entre el cordón de larguero y la carcasa aerodinámica se ha descrito como un adhesivo a base de epoxi. Sin embargo, en una realización alternativa, el cordón de larguero está revestido con una pintura de imprimación antes de disponerse en el rebaje de la carcasa aerodinámica. La pintura de imprimación puede proporcionar una unión química al viniléster o poliéster de la carcasa aerodinámica. Por tanto, el curado de la carcasa de pala puede realizarse después de que el cordón de larguero se haya dispuesto para proporcionar la unión al cordón de larguero. Además, es posible fundir el poliéster o viniléster después y curar luego la estructura.

Lista de números de referencia

2	Turbina eólica
4	Torre
6	Góndola
8	Buje
10	Pala
14	Punta de pala

ES 2 728 273 T3

16	Raíz de pala
18	Borde de ataque
20	Borde de fuga
22	Eje de paso
30	Región de raíz
32	Región de transición
34	Región de superficie aerodinámica
36, 136	Carcasa de lado de presión
38	Carcasa de lado de succión
40	Resalto
150	Primera parte de molde
160	Primer cordón de larguero
161	Molde de cordón de larguero
162	Primer lado de primer cordón de larguero
163	Bolsa de vacío
164	Segundo lado de primer cordón de larguero
165	Cavidad de molde
166	Primer reborde / primera ala / primer saliente
167	Primer material de núcleo intercalado
168	Segundo reborde / segunda ala / segundo saliente
169	Segundo material de núcleo intercalado
170	Primera parte de carcasa aerodinámica / parte de carcasa de lado de presión
172	Primera parte engrosada
174	Segunda parte engrosada
176	Primer rebaje
178	Capa(s) de revestimiento externo
180	Capa(s) de revestimiento interno
182	Primer material de núcleo intercalado intermedio
184	Segundo material de núcleo intercalado intermedio
186	Cavidad entre primer cordón de larguero y rebaje de primera carcasa aerodinámica
188	Bolsa de vacío
190	Elemento de inserción modelo
192	Refuerzo de borde de ataque
194	Refuerzo de borde de fuga

ES 2 728 273 T3

196	Primer elemento de inserción de lado
197	Primera alma de cizalladura
198	Segundo elemento de inserción de lado
199	Segunda alma de cizalladura
250, 250', 350, 350'	Primera parte de molde
252, 293, 295, 352, 393, 395	Orificios de guía
260	Segundo cordón de larguero
290, 390	Elementos de inserción modelos
296, 396	Primeros elementos de inserción de lado
298, 398	Segundos elementos de inserción de lado

REIVINDICACIONES

1. Pala (10) de turbina eólica que comprende:
- una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón (160) de larguero, y
 - una carcasa (170) aerodinámica que tiene una superficie externa que forma al menos parte de una superficie exterior de la pala (10) de turbina eólica y una superficie interna, en la que
- 5
- la estructura portadora de carga se conecta a la carcasa aerodinámica, en la que
 - la carcasa (170) aerodinámica comprende un primer rebaje (176) en la superficie interna de la carcasa (170) de pala (10),
- 10
- en la que la carcasa (170) aerodinámica comprende una primera parte (172) engrosada en un primer lado del primer rebaje (176) y una segunda parte (174) engrosada en un segundo lado del primer rebaje (176), y
 - el primer cordón (160) de larguero se dispone en el primer rebaje (176) de la carcasa (170) aerodinámica,
 - en la que el primer lado del cordón (160) de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al primer lado del rebaje (176), y el segundo lado del cordón (160) de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al segundo lado del rebaje (176),
- 15
- en la que la carcasa (170) aerodinámica y el primer cordón (160) de larguero se fabrican y se precuran de manera independiente, y
 - en la que se forma una cavidad entre una superficie interna del rebaje (176) y una primera superficie del cordón (160) de larguero con el cordón (160) de larguero que se conecta al rebaje (176) de la carcasa (170) por medio de un adhesivo que llena la cavidad, caracterizada porque
- 20
- el primer rebaje (176) se ahúsa hacia el primer lado del rebaje (176) y se ahúsa hacia el segundo lado del rebaje (176), y porque
 - el primer cordón (160) de larguero se ahúsa hacia un primer lado del cordón (160) de larguero y se ahúsa adicionalmente hacia un segundo lado del cordón (160) de larguero.
2. Pala de turbina eólica según la reivindicación 1, en la que
- 25
- la estructura portadora de carga comprende además un segundo cordón de larguero, y
 - la carcasa aerodinámica comprende además un segundo rebaje en la superficie interna de la carcasa de pala, por ejemplo, formado en una parte de carcasa de lado de presión de la carcasa aerodinámica, y en la que
 - el segundo cordón de larguero se dispone en el segundo rebaje de la carcasa aerodinámica, por ejemplo, formado en una parte de carcasa de lado de succión de la carcasa aerodinámica.
- 30
3. Pala de turbina eólica según la reivindicación 2, en la que el primer rebaje está formado en una parte de carcasa de lado de presión de la carcasa aerodinámica, y el segundo rebaje está formado en una parte de carcasa de lado de succión de la carcasa aerodinámica.
- 35
4. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la primera parte (172) engrosada y/o la segunda parte (174) engrosada están formadas como una estructura intercalada que comprende un número de capas de revestimiento externas, un número de capas de revestimiento internas, y un material de núcleo intercalado intermedio.
5. Pala de turbina eólica según la reivindicación 4, en la que el material de núcleo intercalado intermedio es madera de balsa.
- 40
6. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el primer cordón (160) de larguero comprende un primer reborde dispuesto a lo largo de un primer lado del primer cordón (160) de larguero, y un segundo reborde dispuesto a lo largo de un segundo lado del primer cordón (160) de larguero, por ejemplo, con el primer reborde de fibra unido a una superficie interna de la primera parte (172) engrosada de la carcasa (170) aerodinámica y el segundo reborde de fibra unido a una superficie interna de la segunda parte (174) engrosada de la carcasa (170) aerodinámica.
- 45
7. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el cordón (160) de larguero comprende un laminado principal que comprende un número de capas de refuerzo de fibra entre la primera superficie y la segunda superficie y encastradas en una matriz de polímero, y en la que el cordón (160) de larguero comprende además un primer material de núcleo intercalado en el primer lado del cordón (160) de larguero y contiguo al laminado

principal, estando ahusado el primer material de núcleo intercalado en un sentido hacia el laminado principal para proporcionar una transición gradual entre el primer material de núcleo y el laminado principal.

- 5 8. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que el primer cordón (160) de larguero se prefabrica como un objeto reforzado con fibra que comprende un primer material de refuerzo de fibra y un primer material de matriz, y en la que la carcasa (170) aerodinámica está hecha de un material reforzado con fibra que comprende un segundo material de refuerzo de fibra y un segundo material de matriz, y en el que el segundo material de matriz es un poliéster o viniléster, y el primer material de matriz es un material de polímero distinto de poliéster o viniléster.
- 10 9. Pala de turbina eólica según la reivindicación 8, en la que el primer material de refuerzo de fibra comprende fibras de carbono.
- 10 10. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 8-9, en la que el segundo material de refuerzo de fibra es fibras de vidrio.
- 15 11. Método para fabricar una pala (10) de turbina eólica, en el que el método comprende las etapas de:
- 15 a) fabricar y precurar una carcasa (170) aerodinámica que tiene un primer rebaje (176), estando fabricada la carcasa (170) aerodinámica de modo que comprende una primera parte (172) engrosada en un primer lado del primer rebaje (176) y una segunda parte (174) engrosada en un segundo lado del primer rebaje (176), y de modo que el primer rebaje (176) se ahúsa hacia el primer lado del rebaje (176) y se ahúsa hacia el segundo lado del rebaje (176),
- 20 b) fabricar y precurar una estructura portadora de carga que incluye al menos un primer cordón (160) de larguero, estando fabricado el primer cordón (160) de larguero de modo que se ahúsa hacia un primer lado del cordón (160) de larguero y se ahúsa adicionalmente hacia un segundo lado del cordón (160) de larguero,
- 25 c) disponer el primer cordón (160) de larguero en el primer rebaje (176) de la carcasa (170) aerodinámica de modo que el primer lado del cordón (160) de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al primer lado del rebaje (176), y el segundo lado del cordón (160) de larguero se pone a tope o está contiguo sustancialmente al segundo lado del rebaje (176) de modo que se forma una cavidad entre una superficie interna del rebaje (176) y una primera superficie del cordón (160) de larguero, y
- d) conectar el primer cordón (160) de larguero a la carcasa (170) aerodinámica llenando un adhesivo al interior de la cavidad.
- 30 12. Método según la reivindicación 11, en el que el primer cordón (160) de larguero se conecta a la carcasa (170) aerodinámica infundiendo una resina entre el primer cordón (160) de larguero y la carcasa (170) aerodinámica, y curando luego la resina.
13. Método según cualquiera de las reivindicaciones 11-12, en el que la carcasa (170) aerodinámica está fabricada en una primera parte de molde.
14. Método según cualquiera de las reivindicaciones 11-13, en el que el primer cordón (160) de larguero está fabricado en una segunda parte de molde.

35

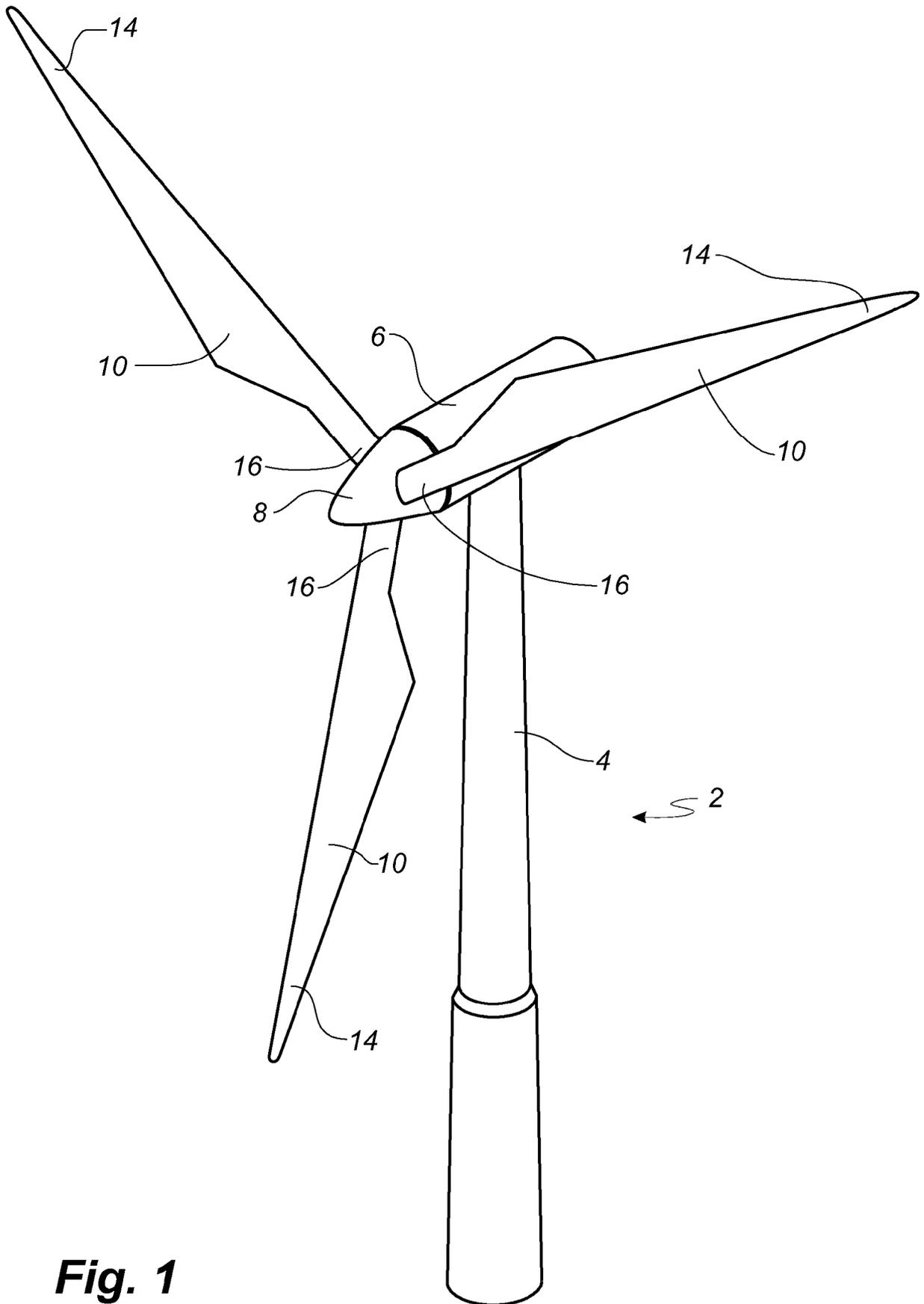


Fig. 1

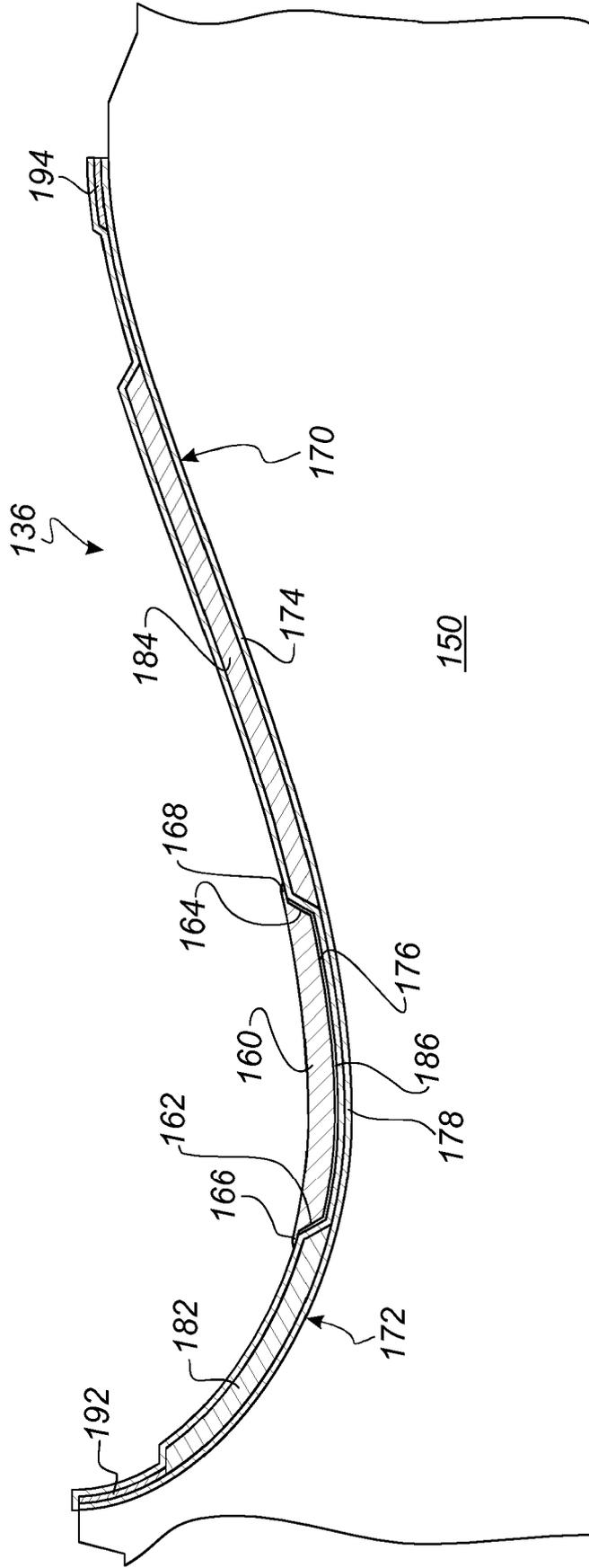


Fig. 3

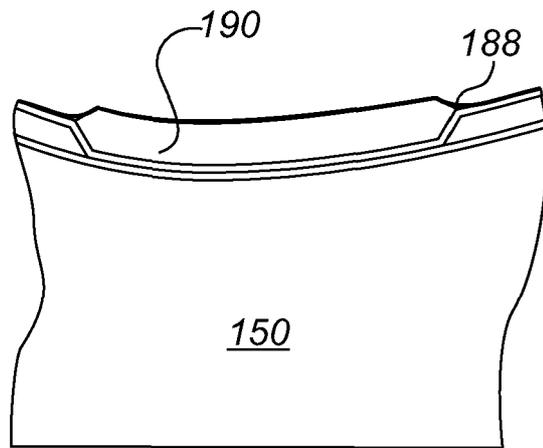


Fig. 4

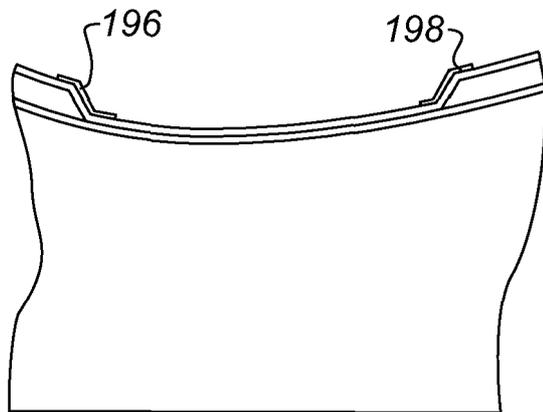


Fig. 5

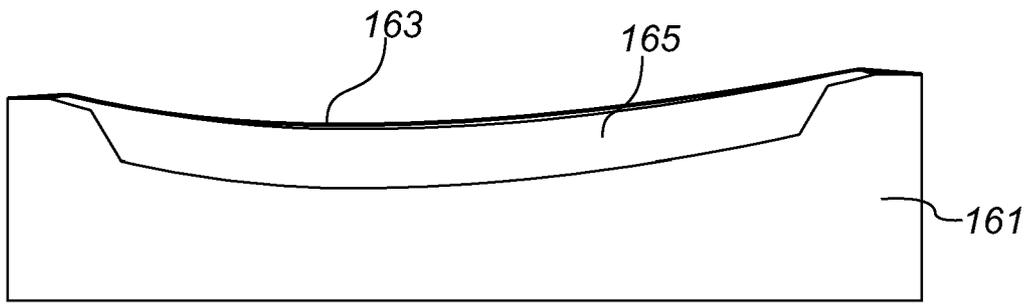


Fig. 6



Fig. 7

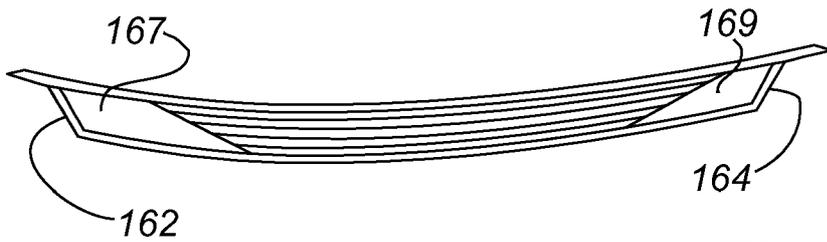


Fig. 8a

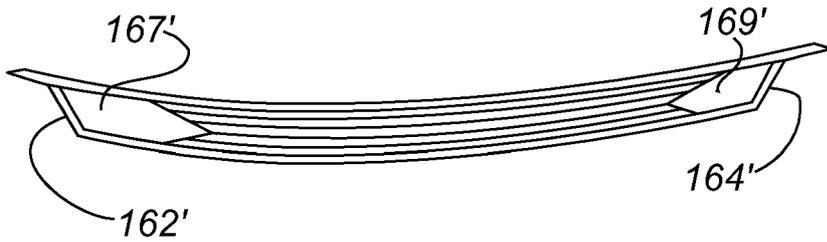


Fig. 8b

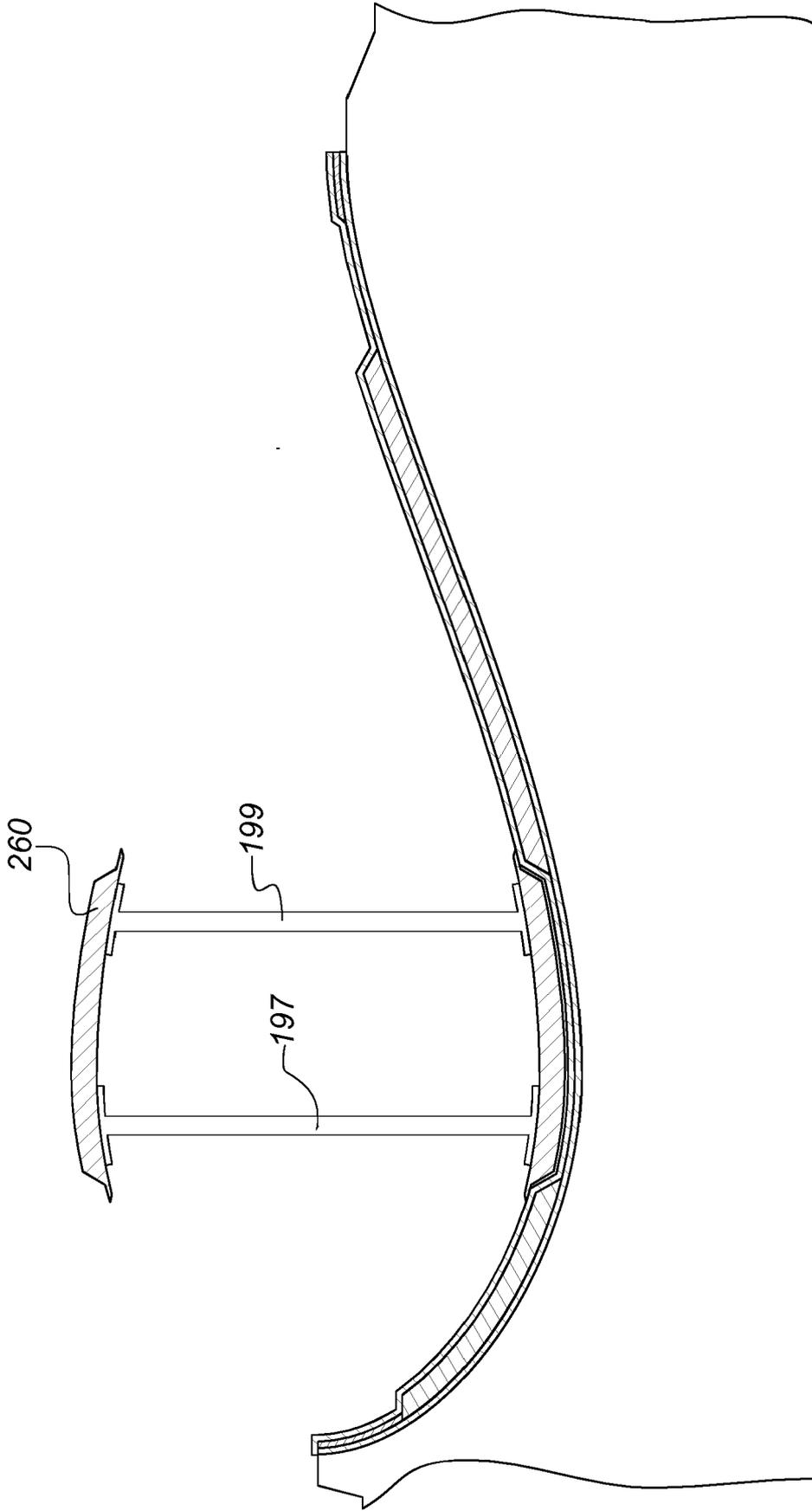


Fig. 9

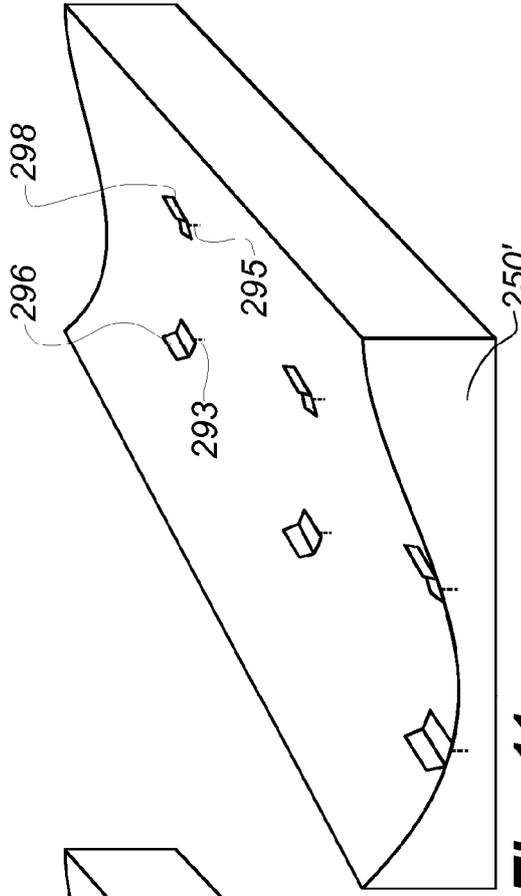


Fig. 11a

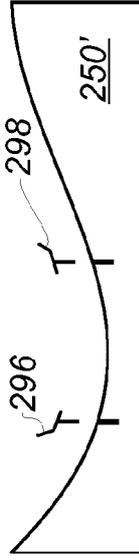


Fig. 11b

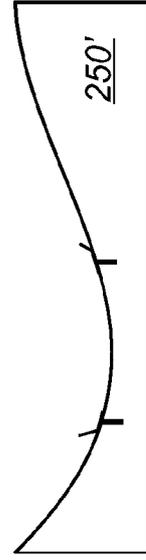


Fig. 11c

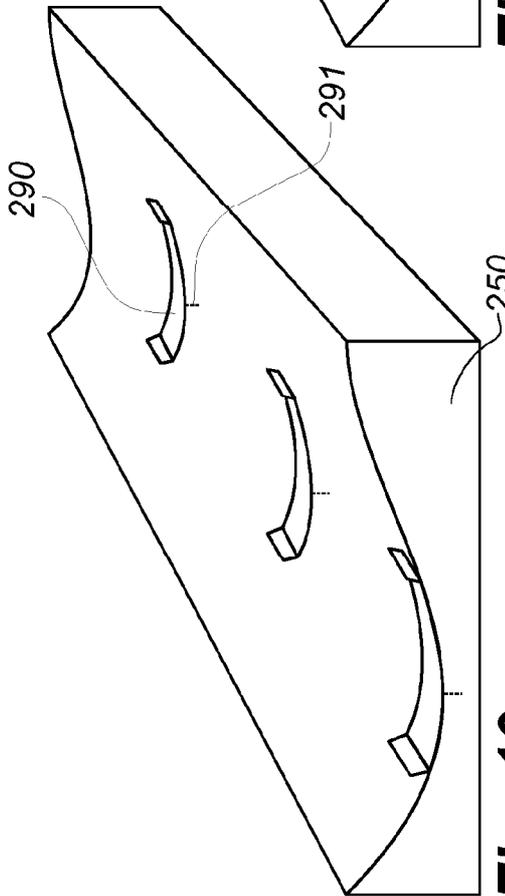


Fig. 10a



Fig. 10b



Fig. 10c

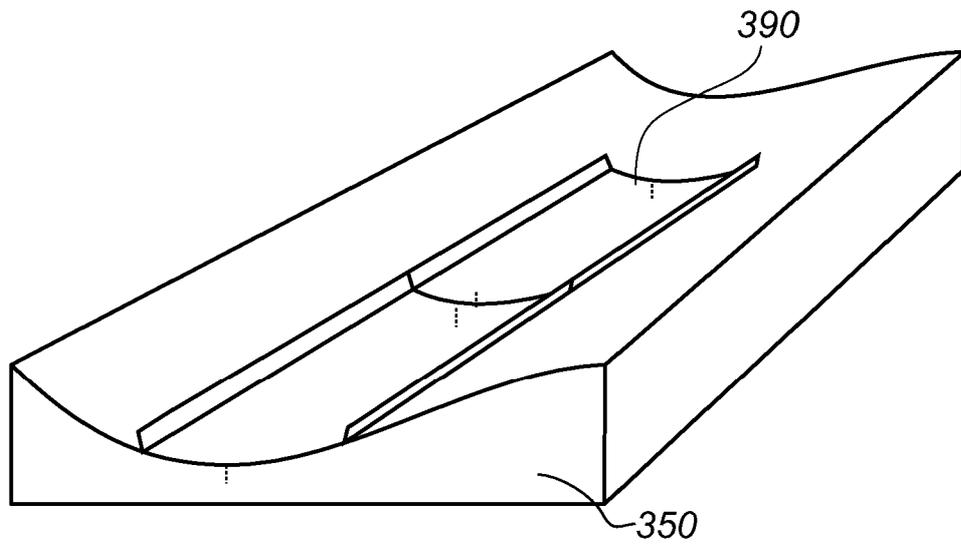


Fig. 12

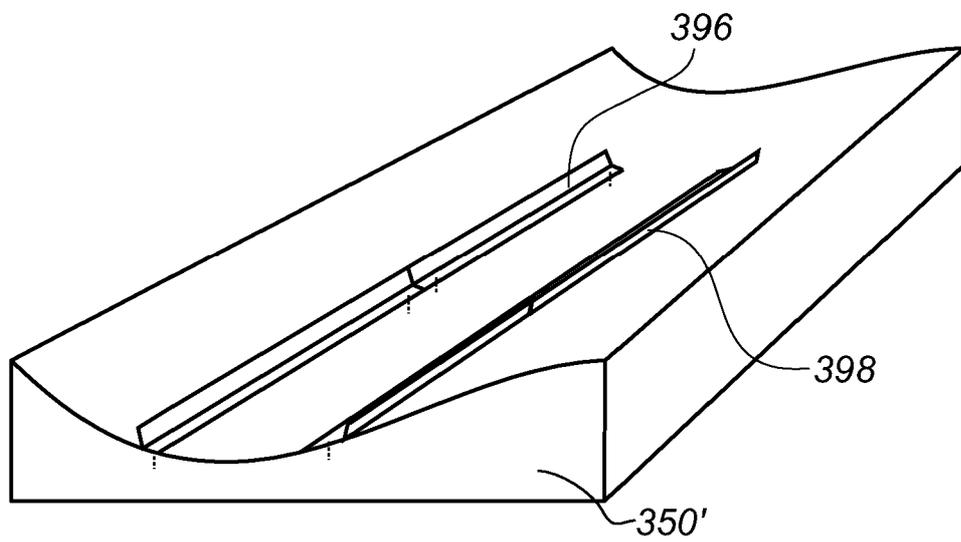


Fig. 13