

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 685 827**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.12.2012 PCT/EP2012/074488**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.06.2013 WO13092211**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.12.2012 E 12799133 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.05.2018 EP 2795104**

54 Título: **Una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica**

30 Prioridad:

19.12.2011 EP 11194239

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

11.10.2018

73 Titular/es:

**LM WIND POWER INTERNATIONAL
TECHNOLOGY II APS (100.0%)
Jupitervej 6
6000 Kolding, DK**

72 Inventor/es:

HAAG, MICHAEL DRACHMANN

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 685 827 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

Una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica

Campo de la invención

5 La presente invención se relaciona con una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica, y una pala de turbina eólica que tiene dicha protección contra la erosión.

Antecedentes de la invención

Durante la vida útil de una turbina eólica, se gastan recursos considerables en operaciones de mantenimiento continuo para garantizar un rendimiento óptimo de la turbina. Con respecto a las palas de una turbina eólica, la erosión en el borde de ataque de las palas es un área de atención.

10 Se sabe que proporciona una protección contra la erosión en el borde de ataque de una pala de turbina eólica. La protección contra la erosión comprende una capa o revestimiento de material elástico resistente a la erosión el cual se aplica a lo largo de la longitud de la pala que cubre el borde de ataque. La protección contra la erosión proporciona resistencia mejorada a la erosión, usualmente formado de un material elástico en oposición al material compuesto de fibra relativamente frágil usado para producir el cuerpo de una pala de turbina eólica, y en consecuencia actúa para mejorar la durabilidad general de la pala de turbina eólica. Un ejemplo de una protección contra la erosión que comprende una película polimérica se puede ver en la WO2009/118545 y la EP 2 153 065.

15 La experiencia de campo ha demostrado que dichas protecciones de erosión o cintas de erosión durarán aproximadamente entre 5-8 años, dependiendo de las condiciones ambientales de la ubicación de la turbina eólica, así como de las condiciones operativas de la turbina, especialmente la velocidad de la punta de la pala. Sin embargo, cuando la capa resistente a la erosión se rompe debido a una fuerte erosión, en general habrá porciones de la capa que quedan en la pala de la turbina que aletean libremente en el viento. Este aleteo dará como resultado una pérdida del rendimiento aerodinámico de la pala, así como la generación de ruido aerodinámico adicional.

20 En el caso de tal ruptura de la protección contra la erosión, dicho rendimiento reducido de la turbina continuará hasta que se realice una operación de mantenimiento para retirar la protección rota. Esto implica una operación extensa y complicada para detener el funcionamiento de la turbina, retirar la protección rota a lo largo del borde de ataque de la pala de la turbina y aplicar una nueva protección contra la erosión a lo largo del borde de ataque.

25 Es un objeto de la invención proporcionar una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica que reduce los problemas asociados con la ruptura de la protección, y requiere un mantenimiento reducido.

Resumen de la invención

30 En consecuencia, se proporciona una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica, la protección contra la erosión que tiene una superficie externa expuesta en un borde de ataque de la pala de turbina eólica y que comprende: una pluralidad de capas de material resistente a la erosión, dicha pluralidad de capas dispuesta en una pila a partir de una capa más externa que forma sustancialmente dicha superficie externa hasta una capa más interna dispuesta para unirse a un borde de ataque de una pala de turbina eólica, dicha pluralidad de capas unidas a capas adyacentes en la pila, en donde dicha pluralidad de capas de material resistente a la erosión tiene una resistencia cohesiva o resistencia a la tracción mayor que la resistencia adhesiva o la resistencia de unión entre capas adyacentes o posteriores, de modo que al menos una sección de una capa expuesta más externa se delaminará o despegará de dicha protección contra la erosión bajo la acción del viento cuando al menos una porción de dicha sección de dicha capa expuesta más exterior ha sido erosionada o rota, para presentar una superficie externa relativamente lisa de dicha protección contra la erosión.

35 Como la capa más externa de material resistente a la erosión se desgasta gradualmente o se erosiona durante el uso de la pala, partes de la capa pueden desprenderse de la superficie de la protección contra la erosión y aletear o batirse con el viento. Debido a la relativa debilidad de la unión entre las capas adyacentes del material resistente a la erosión, una vez que ocurre dicha rotura o ruptura en la capa más externa, la fuerza del viento supera la unión relativamente débil entre capas sucesivas y actúa para delaminarse o desprenderse la sección restante de la capa para eliminar cualquier porción libre de aleteo del material resistente a la erosión de la protección contra la erosión.

40 Esta eliminación dinámica de las capas externas de la protección contra la erosión una vez que dichas capas fallan, reduce el ruido aerodinámico producido por dichas fallas, así como también elimina cualquier comportamiento aerodinámico negativo como resultado de las secciones de aleteo o bateo de la protección contra la erosión. También proporciona un mantenimiento reducido de las palas de la turbina eólica en servicio, ya que aumenta el tiempo entre las operaciones de servicio para reemplazar o limpiar una protección contra la erosión de una pala de turbina eólica.

Se comprenderá que la protección contra la erosión puede estar dispuesta para despegarse o delaminar una capa completa de material resistente a la erosión de una vez, o para delaminar secciones individuales de la capa o capas expuestas las cuales contienen la ubicación donde ocurre la ruptura o falla de la protección contra la erosión.

5 Preferiblemente, dicha pluralidad de capas está unida de manera adhesiva a capas adyacentes en la pila, y en donde dicha pluralidad de capas de material resistente a la erosión tiene una resistencia cohesiva mayor que la resistencia de unión adhesiva entre capas adyacentes.

10 A la vez que el requisito normal para una buena adhesión es superior a 5 MPa en el arranque de acuerdo con ISO 4624 con modo de falla cohesiva, preferiblemente la resistencia de unión adhesiva, en particular la resistencia adhesiva de arranque, entre capas adyacentes es inferior a 5 MPa, preferiblemente por debajo de 2 MPa, con modo de falla adhesiva entre las capas adyacentes. Tal resistencia de unión adhesiva relativamente baja asegura que las capas adyacentes se delaminarán fácilmente cuando una capa externa se haya erosionado o roto, para asegurar la eliminación dinámica de las capas de protección contra la erosión.

15 Preferiblemente, dichas capas de material resistente a la erosión comprenden una superficie interna opuesta a la superficie externa de la protección contra la erosión y una superficie exterior que se aleja de la superficie externa de la protección contra la erosión, en donde dicha protección contra la erosión comprende además al menos una capa de material de puntal localizado entre capas adyacentes de material resistente a la erosión para unir superficies internas y externas adyacentes de capas adyacentes de material resistente a la erosión en dicha pila.

La protección contra la erosión está formada como una estructura intercalada de material resistente a la erosión y material de puntal.

20 En una realización, dicha al menos una capa de puntal comprende una capa de adhesivo.

25 Las capas de adhesivo se proporcionan como una capa adhesiva desechable entre las capas del material resistente a la erosión, la cual se descartará cuando la capa externa de material resistente a la erosión se delamina o se despegue de la protección contra la erosión. La capa de puntal puede comprender un material termoplástico y/o un material de recubrimiento que funcionará como una capa de erosión semiresistente así como funciona como un adhesivo entre capas adyacentes del material resistente a la erosión, cuando el material de recubrimiento se cura después de ser aplicado.

Preferiblemente, dicha al menos una capa de puntal tiene una resistencia cohesiva a la tracción menor que la resistencia cohesiva a la tracción de dichas capas de material resistente a la erosión.

30 Preferiblemente, el alargamiento a la ruptura para la capa de puntal es menor que el alargamiento en ruptura del material resistente a la erosión.

35 La protección contra la erosión se puede formar como un único miembro que tiene capas intercaladas de diferentes sustancias que tienen diferentes propiedades del material, por ejemplo el material resistente a la erosión puede comprender un material plástico maleable que absorberá sustancialmente las fuerzas de erosión a lo largo del tiempo, a la vez que la capa de puntal puede comprender un material flexible el cual puede despegarse fácilmente de la superficie de la protección bajo la acción del viento.

De manera adicional o alternativa, la capa de puntal puede comprender un material quebradizo o frágil que puede desprenderse fácilmente de la protección, para eliminar porciones rotas del material resistente a la erosión. En dicho caso, la resistencia a la tracción de la capa de unión se elige para que sea fácilmente rompible o frangible, de manera que la capa de unión puede separarse fácilmente de la protección contra la erosión.

40 La fabricación de una protección contra la erosión de este tipo puede realizarse mediante la coextrusión de dos termoplásticos que tienen diferentes propiedades de material.

Preferiblemente, dicha al menos una capa de material de puntal tiene una unión relativamente más fuerte a una superficie interna adyacente de una capa de material resistente a la erosión que a una superficie exterior adyacente de una capa de material resistente a la erosión.

45 El material de puntal está mejor unido a la capa externa de la protección contra la erosión, de modo que el material de puntal se descarta o despegue con la capa exterior erosionada. Para dicha construcción, la capa de puntal puede formarse integralmente con la capa exterior adyacente de material resistente a la erosión, y unirse adhesivamente a la cara externa de la capa de material de erosión adyacente interior.

50 En una realización, la capa de puntal puede estar formada por una cinta adhesiva aplicada al lado inferior o la superficie interna de cada capa de material de erosión, para unirse a la capa de material de erosión subsiguiente. En este caso,

la cinta puede aplicarse a la superficie interna de la capa anterior de material resistente a la erosión usando un adhesivo fuerte, a la vez que la unión a la superficie externa de la capa subsiguiente de material resistente a la erosión se realiza usando un adhesivo de baja tensión superficial.

5 Por ejemplo, los adhesivos acrílicos sensibles a la presión proporcionan una resistencia de unión relativamente mayor en comparación con un adhesivo a base de silicona sensible a la presión. A este respecto, la capa de puntal puede unirse a la superficie interna de la capa anterior de material resistente a la erosión utilizando un adhesivo acrílico sensible a la presión, y unirse a la superficie exterior de la capa subsiguiente de material resistente a la erosión mediante una silicona sensible a la presión a base de adhesivo.

10 Preferiblemente, dicha protección contra la erosión está dispuesta para extenderse en una dirección longitudinal a lo largo de una porción de un borde de ataque de una pala de turbina eólica, y en donde dichas capas de material resistente a la erosión están divididas en una pluralidad de secciones a lo largo de la protección contra la erosión, en donde dichas secciones de dichas capas resistentes a la erosión están dispuestas para delaminarse individualmente cuando al menos una porción de una capa resistente a la erosión dentro de una sección particular se ha erosionado o roto.

15 Las capas de la protección contra la erosión se pueden dividir en diferentes secciones a lo largo de la longitud del borde de ataque, de modo que las secciones individuales se pueden despegar por separado o de manera independiente. En consecuencia, si la capa de protección contra la erosión solo se rompe en una parte de la protección contra la erosión, entonces la capa solo se despegará en las proximidades de ese punto de ruptura particular. Esto impide la eliminación de toda una capa de la protección contra la erosión si solo ha habido una pequeña ruptura de la capa, lo que prolonga la vida útil de toda la protección contra la erosión.

20 Preferiblemente, dicha pluralidad de secciones está prevista hacia el extremo de punta de la pala de turbina eólica.

25 Debido a la mayor velocidad en el extremo de la punta de la pala, la erosión se ve normalmente en más ocasiones en el extremo de la punta de la pala. En consecuencia, las secciones de una protección contra la erosión dispuestas en un extremo de punta de una pala sufrirán en general más erosión que las secciones hacia el extremo de la raíz de la pala.

30 Preferiblemente, la protección contra la erosión tiene un extremo de punta para su ubicación hacia el extremo de punta de una pala de turbina eólica y un extremo de raíz para su ubicación hacia el extremo de raíz de una pala de turbina eólica, teniendo dicha pluralidad de secciones un ancho de sección medido en una dirección longitudinal entre el extremo de raíz y el extremo de punta de dicha protección contra la erosión, en donde dicha pluralidad de secciones están dispuestas de manera que el ancho de sección de secciones individuales disminuye moviéndose a partir del extremo de raíz hasta el extremo de punta de la protección contra la erosión.

35 En una realización, la protección contra la erosión tiene un extremo de punta para su ubicación hacia el extremo de punta de una pala de turbina eólica y un extremo de raíz para su ubicación hacia el extremo de raíz de una pala de turbina eólica, en donde el número de capas o material resistente a la erosión que se proporciona en el extremo de punta de la protección contra la erosión es mayor que el número de capas de material resistente a la erosión que se proporciona en el extremo de raíz de la protección contra la erosión.

40 Como el extremo de punta de la protección contra la erosión experimentará una mayor erosión que el extremo de raíz, la provisión de un mayor número de capas de material resistente a la erosión en el extremo de punta conducirá a un funcionamiento más eficaz de la protección contra la erosión, y una vida más larga entre las operaciones de reemplazo.

45 Preferiblemente, un límite entre secciones adyacentes de dichas capas de material resistente a la erosión se define por una línea o tira debilitada o perforada en al menos una de dichas capas de material resistente a la erosión o dichas capas de material de puntal, preferiblemente en dichas capas de material de puntal.

Una línea perforada proporciona un punto de desgarro relativamente simple y bien definido entre las secciones adyacentes de dichas capas. Adicional o alternativamente, un límite entre las secciones adyacentes de dichas capas de material resistente a la erosión puede definirse por una porción frágil o rompible entre secciones adyacentes. Adicional o alternativamente, un límite entre las secciones adyacentes de dichas capas se puede definir mediante una sección marcada o debilitada de dichas capas.

50 En una realización adicional, la protección contra la erosión puede comprender una sección perforada, debilitada, ranurada o frágil dispuesta en una dirección longitudinal paralela al borde de ataque de la protección contra la erosión, para permitir la delaminación o despegado más fácil de las capas de protección contra la erosión lejos de dicho borde de ataque. En dicho caso, preferiblemente dicha sección que se puede romper se define en las capas de puntal entre capas adyacentes de material resistente a la erosión. Dicha sección rompible longitudinal de la protección contra la erosión puede estar situada en la protección contra la erosión en el punto límite entre el lado de presión y el lado de

succión de una turbina eólica para recibir la protección contra la erosión, o puede colocarse en una ubicación alternativa, por ejemplo en una ubicación en la protección contra la erosión que corresponde al ángulo de ataque preferido del viento que se aproxima en la pala de la turbina eólica.

5 En una realización, dichas capas de material resistente a la erosión están formadas por un primer material elástico y un segundo material flexible, dicho primer material elástico está provisto en dicha protección contra la erosión para cubrir un borde de ataque de una pala de turbina eólica, dicho segundo material flexible dispuesto para extenderse a partir de dicho primer material elástico a cada lado de dicho borde de ataque.

10 Al proporcionar las capas resistentes a la erosión como un compuesto de un material elástico en el borde de ataque y un material flexible que depende del borde de ataque da como resultado un alto grado de resistencia a la erosión, debido al material elástico, pero el cual es relativamente fácil de desprenderse de la protección contra la erosión una vez que dicho material resistente ha sido erosionado o roto.

15 En una realización adicional o alternativa, dicha pluralidad de capas de material resistente a la erosión está unida a capas adyacentes en la pila usando al menos un área de unión, en donde dicha al menos un área de unión entre capas adyacentes de material resistente a la erosión está dispuesta adyacente el borde de ataque de la protección contra la erosión.

20 En esta realización, preferiblemente las capas de material resistente a la erosión no están unidas entre sí en el borde de ataque. Esto permite que las capas se despeguen más fácilmente de la protección contra la erosión, ya que una vez que se rompe una capa, se despegará a partir del punto de ruptura hasta el área de unión. En consecuencia, la sección no limitada de la capa presentará un área de superficie mayor al viento que se aproxima, y la fuerza de delaminación ejercida sobre la capa será mayor.

Preferiblemente, se define una cavidad o canal en dichas capas de material de puntal, dicho canal o cavidad dispuesto adyacente al lado inferior de la superficie interna de la capa exterior adyacente de material resistente a la erosión, preferiblemente en el borde de ataque de la protección contra la erosión.

25 El uso de una cavidad adyacente a la superficie inferior de una capa de material resistente a la erosión significa que la capa resistente a la erosión no está unida a la capa subyacente en el borde de ataque. Por lo tanto, una vez que se produce una ruptura o erosión de la capa externa en el borde de ataque, la capa de material resistente a la erosión se delaminará más fácilmente de la protección contra la erosión, mejorando el rendimiento de la protección.

Preferiblemente, dicho canal es una abertura pasante que se extiende a través de dicha capa de material de puntal.

30 Preferiblemente, dichas capas de material resistente a la erosión tienen aproximadamente 0.1-0.5 mm de profundidad, preferiblemente 0.3 mm de profundidad.

Preferiblemente, dicha al menos una capa de material de puntal es aproximadamente de 0.05-0.25 mm de profundidad, preferiblemente de 0.1 mm de profundidad.

En una realización, la pluralidad de capas de material resistente a la erosión puede formarse a partir de diferentes tipos de materiales resistentes a la erosión, teniendo dichos materiales diversas propiedades diferentes.

35 Preferiblemente, dicho material resistente a la erosión se puede seleccionar a partir de los siguientes materiales disponibles: W8607 de 3M o 54994 PV3 de tesa SE.

Preferiblemente, dicho material de puntal se puede seleccionar de los siguientes materiales disponibles: STEODURPUR-Kantenschutz de Bergolin; ALEXIT Leading Edge Protection 442-52 de Mankiewicz; XA258 de Hempel; o Oldodur Blade Finish de Relius.

40 También se proporciona una pala de turbina eólica que tiene una protección contra la erosión como se describió anteriormente.

45 En particular, la pala de turbina eólica se extiende en una dirección longitudinal paralela a un eje longitudinal y comprende un extremo de punta y un extremo de raíz, comprendiendo la pala de turbina eólica un contorno perfilado que incluye un lado de presión y un lado de succión, así como un borde de ataque y un borde posterior con una cuerda que tiene una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, el contorno perfilado, cuando es impactado por un flujo de aire incidente, generando sustentación, en donde la protección contra la erosión está provista a lo largo de al menos una sección de dicho borde de ataque.

50 En una realización, la pala de turbina eólica comprende un canal formado en el borde de ataque de la pala, dicho canal para recibir dicha protección contra la erosión de manera que la protección contra la erosión esté a ras de las superficies de la pala adyacentes al canal y la protección contra la erosión.

Se proporciona además una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica que comprende una protección contra la erosión como se describió anteriormente.

5 En particular, la turbina eólica comprende una pala de turbina eólica para un rotor de una turbina eólica que tiene un eje de rotor sustancialmente horizontal, comprendiendo el rotor un repartidor, a partir del cual la pala de la turbina eólica se extiende sustancialmente en una dirección radial cuando se monta en el repartidor.

Descripción de la invención

Se describirá ahora una realización de la invención, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:

La Figura 1 muestra una turbina eólica;

10 La Figura 2 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención;

La Figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil aerodinámico de la pala de la Figura 2;

La Figura 4 muestra una vista en sección transversal de una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención;

15 Las Figuras 5(a) - (c) ilustran en sección transversal parcial la operación de la protección contra la erosión de la Figura 4 en uso en la pala de la Figura 2;

La Figura 6 muestra una vista en perspectiva de una porción de una realización de protección contra la erosión de acuerdo con la invención;

La Figura 7 muestra una vista en sección transversal de una realización adicional de protección contra la erosión de acuerdo con la invención; y

20 La Figura 8 muestra una vista en sección transversal de una realización adicional de protección contra la erosión de acuerdo con la invención.

Se hará referencia a los elementos comunes entre las diferentes realizaciones usando los mismos números de referencia.

25 La Figura 1 ilustra una turbina eólica moderna convencional contra el viento de acuerdo con 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 repartidor 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente a partir del repartidor 8, teniendo cada una, una raíz 16 de pala más cercana al repartidor y una punta 14 de pala más alejada del repartidor 8. El rotor tiene un radio denotado R.

30 La Figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala 10 de turbina eólica de acuerdo con una realización de 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 más cercana al repartidor, una región 34 de perfil aerodinámico más alejada del núcleo y una región 32 de transición entre la región 30 de raíz y la región 34 de perfil aerodinámico. La pala 10 comprende un borde 18 de ataque orientado hacia la dirección de rotación de la pala 10, cuando la pala está montada en el repartidor, y un borde 20 posterior orientado en la dirección opuesta al borde 18 de ataque.

35 La región 34 de perfil aerodinámico (también llamada región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de sustentación, a la vez que la región 30 de raíz debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, lo cual por ejemplo hace más fácil y seguro montar la pala 10 en el repartidor. El diámetro (o la cuerda) de la región 30 de raíz es típicamente constante a lo largo de toda el área 30 de raíz. La región 32 de transición tiene un perfil 42 de transición que cambia gradualmente a partir de la forma 40 circular o elíptica de la región 30 de raíz al perfil 50 aerodinámico de la región 34 de perfil aerodinámico. La longitud de la cuerda de la región 32 de transición típicamente aumenta sustancialmente linealmente a medida que aumenta la distancia r a partir del repartidor.

40 La región 34 de perfil aerodinámico tiene un perfil 50 aerodinámico con una cuerda que se extiende entre el borde 18 de ataque y el borde 20 posterior de la pala 10. El ancho de la cuerda disminuye al aumentar la distancia r a partir del repartidor.

45 Debe observarse que las cuerdas de diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, ya que la pala puede estar retorcida y/o curvada (es decir, doblada previamente), proporcionando así el plano

de cuerda con un correspondiente curso retorcido y/o curvo, siendo este el caso más frecuente para compensar la velocidad local de la pala que depende del radio del repartidor.

5 La Figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil 50 aerodinámico de una pala típica de una turbina eólica representada con los diversos parámetros, los cuales se usan típicamente para definir la forma geométrica de un perfil aerodinámico. El perfil 50 aerodinámico tiene un lado 52 de presión y un lado 54 de succión, que durante el uso, es decir, durante la rotación del rotor, normalmente se orientan hacia el lado de barlovento (o contra el viento) y el lado de sotavento (o con el viento), respectivamente. El perfil 50 aerodinámico tiene una cuerda 60 con una longitud de cuerda c la cual se extiende entre un borde 56 de ataque y un borde 58 posterior de la pala. El perfil 50 aerodinámico tiene un espesor t , el cual se define como la distancia entre el lado 52 de presión y el lado 54 de succión. El espesor t del perfil aerodinámico varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación de un perfil simétrico está dada por una línea 62 de curvatura, la cual es una línea mediana a través del perfil 50 aerodinámico. La línea media se puede encontrar dibujando círculos inscritos a partir del borde 56 de ataque hasta el borde 58 posterior. La línea media sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia a partir de la cuerda 60 se llama curvatura f . La asimetría también se puede definir mediante el uso de parámetros denominados la curvatura superior y la curvatura inferior, que se definen como las distancias a partir de la cuerda 60 y el lado 54 de succión y el lado 52 de presión, respectivamente.

Los perfiles aerodinámicos a menudo se caracterizan por los siguientes parámetros: la longitud de cuerda c , la máxima curvatura f , la posición d_f de la máxima curvatura f , el espesor t máximo de perfil aerodinámico, que es el diámetro más grande de los círculos inscritos a lo largo de la línea 62 de curvatura mediana, la posición d_t del espesor t máximo, y un radio de punta (no se muestra). Estos parámetros se definen típicamente como radios para la longitud c de cuerda.

20 Con referencia a la Figura 5, una protección contra la erosión de acuerdo con la invención se indica en general en 70. La protección 70 contra la erosión comprende una superficie 70a de borde de ataque exterior, y una superficie 70b de pala interna la cual está dispuesta para aplicarse al borde 56 de ataque de una pala 10 de turbina eólica.

La protección 70 contra la erosión comprende una pluralidad de capas de material 72 resistente a la erosión, intercaladas con capas de un material 74 de puntal, para crear una estructura apilada. La superficie 70a de borde de ataque exterior está formada sustancialmente por la capa más externa del material 72 resistente a la erosión. Preferentemente, la protección 70 contra la erosión comprende además una capa 76 adhesiva dispuesta en dicha superficie 70b de pala interna, dicha capa 76 adhesiva dispuesta para unir la protección 70 contra la erosión a un borde 56 de ataque de la pala.

30 El material 72 resistente a la erosión está formado preferiblemente por un material elástico que tiene propiedades mejoradas de resistencia a la erosión con relación al material relativamente frágil que forma el cuerpo de una pala 10 de turbina eólica.

El material 74 de puntal se forma a partir de un material sustancialmente desechable o debilitado, de modo que existe una resistencia de unión adhesiva relativamente baja entre capas posteriores del material 72 resistente a la erosión. Esto permite que el material 72 resistente a la erosión se desprenda con relativa facilidad a partir de o delaminarse de la protección 70 contra la erosión en el caso de una ruptura de capa.

35 Aunque solo se muestran tres capas de material 72 resistente a la erosión y de material 74 de puntal en la realización de la Figura 4, se entenderá que la protección 70 contra la erosión puede comprender cualquier número de capas adecuadas. Esto puede seleccionarse dependiendo de la vida útil deseada de la protección 70 contra la erosión, ya que un mayor número de capas de material 72 resistente a la erosión daría como resultado una vida útil más larga de la protección 70 contra la erosión antes de que se requiera el reemplazo.

Con referencia a las Figuras 5(a), (b) y (c), se ilustra el funcionamiento de una protección 70 contra la erosión en una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención. Solo se muestran las capas externas de materiales 72, 74 resistentes a la erosión y de puntal.

45 La Figura 5(a) ilustra la protección 70 contra la erosión bajo operación normal en una pala de turbina eólica (no se muestra). La capa expuesta más exterior del material 72 resistente a la erosión está provista en el borde de ataque de la pala, y es actuada por el viento venidero, indicado por las flechas A. El material 72 resistente a la erosión que es más resistente a la erosión que el material compuesto de fibra relativamente frágil que forma el cuerpo de la pala de la turbina eólica, es más capaz de resistir la acción abrasiva del viento y cualquier objeto extraño, arena, sal, etc. transportado por el viento A.

50 Sin embargo, después de un período de tiempo, la capa externa del material 72 resistente a la erosión se romperá debido a la acción erosiva y abrasiva continuada del viento A, como se muestra en la Figura 5(b). En el lugar donde se rompe la capa 72 resistente a la erosión, la capa del material 72 resistente a la erosión formará bordes o extremos

72a, 72b libres. El viento A actuará en general para agitar dichos extremos 72a, 72b libres, actuando sobre el lado inferior ahora expuesto de la capa 72 más exterior.

5 Se entenderá que los extremos 72a, 72b libres que se muestran en la Figura 5(b) pueden exagerarse por motivos de claridad, y que una ruptura inicial de una capa exterior de material puede no dar como resultado extremos libres del material que aletean libremente, en lugar de una abertura definida en la capa externa que, sobre la acción erosiva continua, puede dar como resultado extremos libres como se muestra en la Figura 5(b).

10 Con referencia a la Figura 5(c), la acción del viento A sobre los extremos 72a, 72b libres de la capa más exterior del material 72 resistente a la erosión actuará para obligar a la capa 72 resistente a la erosión a retroceder a partir del punto de ruptura en el borde de ataque de la protección 70 contra la erosión. Debido a la presencia de la capa 74 debilitada o desechable subyacente, la capa 72 más externa resistente a la erosión se delamina fácilmente de la protección contra la erosión sin una cantidad sustancial de fuerza, por ejemplo la capa 72 más externa puede delaminarse dinámicamente de la protección 70 contra la erosión únicamente bajo la acción del viento A.

15 A medida que la capa más externa del material 72 resistente a la erosión, así como la capa subyacente del material 74 de puntal, se despegan de la protección 70 contra la erosión por el viento A, la siguiente capa de material resistente a la erosión de la protección 72 queda expuesta al viento A. La protección 70 contra la erosión presenta una superficie relativamente suave resistente a la erosión, sin pérdida de eficiencia aerodinámica o aumento del ruido aerodinámico debido a la presencia continua de extremos que aletean de capas de la protección contra la erosión en el borde de ataque de la pala.

20 El ciclo de ruptura y delaminación dinámico o despegado anterior se repite iterativamente para cada capa de material 72 resistente a la erosión que se proporciona en la protección 70 contra la erosión. Por consiguiente, la protección 70 contra la erosión está dispuesta para arrojar dinámicamente capas externas del material 72 resistente a la erosión una vez que se hayan utilizado dichas capas, sin requerir operaciones de mantenimiento extensas.

25 El material 74 de capa de puntal se elige de manera que la resistencia de unión adhesiva entre capas adyacentes del material 72 resistente a la erosión sea menor que la resistencia a la tracción cohesiva del material 72 resistente a la erosión. Por consiguiente, una vez que la capa externa de material resistente a la erosión se ha erosionado o roto, la resistencia al despegado requerida para delaminar la capa rota de la protección 70 es relativamente baja, y se puede realizar simplemente bajo la acción del viento.

30 Un indicador normal de buena resistencia de unión adhesiva es que la resistencia al arranque bajo ISO 4624 es superior a 5 MPa con modo de falla cohesiva. Por consiguiente, la resistencia de unión adhesiva entre las capas adyacentes del material 72 resistente a la erosión de la protección 70 contra la erosión de acuerdo con la invención está por debajo de 5 MPa, preferiblemente por debajo de 2 MPa.

35 El material 72 resistente a la erosión puede ser cualquier material que presente buenas propiedades resistentes a la erosión, por ejemplo cualquier material como se conoce de los dispositivos resistentes a la erosión existentes, por ejemplo cinta de helicóptero y/o materiales como W8607 de 3M o 54994 PV3 de tesa SE. Preferiblemente, dichas capas de material resistente a la erosión tienen aproximadamente 0.1-0.5 mm de profundidad, preferiblemente 0.3 mm de profundidad.

40 La capa de material 74 de puntal puede formarse a partir de un adhesivo que tiene una resistencia de unión relativamente baja entre las capas 72 resistentes a la erosión adyacentes. En este caso, la protección 70 contra la erosión puede formarse adhiriendo sucesivas capas de material 72 resistente a la erosión en conjunto en una pila. Preferiblemente, dicha al menos una capa de material de puntal es aproximadamente de 0.05-0.25 mm de profundidad, preferiblemente de 0.1 mm de profundidad.

45 Preferiblemente, la capa 76 de adhesivo dispuesta para unir la protección 70 contra la erosión al borde 56 de ataque de pala comprende una capa de adhesivo sensible a la presión de base acrílica, pero se entenderá que puede usarse cualquier capa adhesiva adecuada. El espesor de la capa de adhesivo puede ser de aproximadamente 0.05 – 0.25 mm, preferiblemente 0.1 mm.

50 En una realización, la capa 74 de puntal puede proporcionarse como una cinta adhesiva de doble cara, en donde la capa 74 de puntal está unida a la capa exterior adyacente del material 72 resistente a la erosión usando un adhesivo relativamente fuerte, y está unida a la capa interior adyacente de material 72 resistente a la erosión que usa un adhesivo relativamente débil, de modo que en el caso de delaminación o despegado de la capa externa resistente a la erosión adyacente, la cinta adhesiva se eliminará con la capa externa, exponiendo así una superficie lisa de la subyacente capa interna adyacente de material resistente a la erosión. En dicho caso, se puede usar un adhesivo acrílico sensible a la presión en el lado de la cinta adhesiva unido a la capa externa adyacente, a la vez que se puede

usar un adhesivo a base de silicona sensible a la presión en el lado de la cinta adhesiva unido a la capa adyacente interior.

5 De forma adicional o alternativa, la protección 70 contra la erosión se puede formar como una única estructura formada o moldeada que tiene una disposición intercalada de capas de materiales que tienen diferentes propiedades estructurales, por ejemplo mediante la coextrusión de dos termoplásticos que tienen diferentes propiedades de material. Las capas 74 de puntal pueden estar formadas de un material que tiene una estructura quebradiza o frágil, que puede separarse de forma relativamente fácil de la protección 70 contra la erosión una vez que se ha erosionado una capa 72 resistente a la erosión superpuesta.

10 Las capas 74 de puntal pueden comprender un material termoplástico, y/o un material de revestimiento que funcionará como una capa de erosión semiresistente así como que funcionará como un adhesivo entre capas adyacentes del material 72 resistente a la erosión.

15 Preferiblemente, el material 74 de puntal se selecciona de cualquiera de los siguientes materiales disponibles: STEODUR-PUR-Kantenschutz de Bergolin; ALEXIT Leading Edge Protection 442-52 de Mankiewicz; XA258 de Hempel; o Oldodur Blade Finish de Relius. Se entenderá que puede usarse cualquier otro material de puntal adecuado en la protección contra la erosión.

20 Una mejora adicional posible de la invención se ilustra en la Figura 6. La protección 70 contra la erosión se proporciona en el borde de ataque de una pala de turbina eólica (no se muestra), extendiéndose la protección 70 a lo largo de una porción de la longitud de la pala. La protección 70 contra la erosión está dividida en una serie de secciones 78 a lo largo de la longitud de la protección 70, el límite entre secciones 78 adyacentes está marcado por una sección rompible, frágil o debilitada (indicada por líneas 80 punteadas) de la protección 70 que se extiende en una dirección transversal a la dirección longitudinal de la protección 70 contra la erosión. Dichas secciones 80 debilitadas pueden comprender un área de la protección que comprende intencionalmente capas 72, 74 o espesor reducido, y/o una sección perforada o ranurada de al menos una de las capas 72, 74 de la protección contra la erosión.

25 Las secciones debilitadas 80 proporcionan una línea de ruptura predefinida para al menos una de las capas 72, 74 de la protección 70 contra la erosión, de modo que cualquier delaminación de las capas 72, 74 de protección contra la erosión puede disponerse para que se produzca solo a esa sección 78 de la protección contra la erosión donde se produce una ruptura o erosión de la capa más externa del material 72 resistente a la erosión. Esto proporciona un rendimiento mejorado de la protección 70 contra la erosión, ya que puede impedirse que la capa externa del material 72 resistente a la erosión se delamine completamente como resultado de un único punto de ruptura.

30 De acuerdo con esto, se entenderá que la superficie 70a de borde de ataque exterior de la protección contra la erosión puede estar formada por las secciones expuestas de una pluralidad de las capas de material 72 resistente a la erosión, dependiendo de la extensión de la erosión que se produce en cada una de las secciones 78 predefinidas. Preferiblemente, se proporciona un mayor número de secciones hacia el extremo de la protección contra la erosión provisto en el extremo de punta de la pala de turbina eólica. Debido a la mayor erosión experimentada en el extremo de la punta de la pala en oposición al extremo de la raíz de la pala, en consecuencia es de mayor preocupación que las partes de la protección contra la erosión en esta área puedan reaccionar de manera eficiente ante cualquier ruptura o erosión de la capa externa de la protección contra la erosión.

35 Se entenderá que las secciones individuales de la protección contra la erosión, cuando se miden a lo largo de la dirección longitudinal de la protección contra la erosión, pueden disminuir de ancho moviéndose a partir del extremo de la raíz de la protección contra la erosión hacia el extremo de la punta de la protección contra la erosión.

40 Adicionalmente o alternativamente, la protección contra la erosión puede construirse para tener un mayor número de capas de material 72 resistente a la erosión, y posiblemente capas de material 74 de puntal, en el extremo de punta de la protección 70 contra la erosión que en el extremo de raíz de la protección 70 contra la erosión. Esto asegura que habrá proporcionalmente más protección contra la erosión en el extremo de la punta de la pala, donde la protección es más necesaria. Dicha construcción proporciona una protección contra la erosión más efectiva, y aumenta el tiempo entre las operaciones de mantenimiento para reemplazar la protección contra la erosión.

45 Adicional o alternativamente, la protección 70 contra la erosión puede comprender una línea de desgarramiento debilitada adicional (no se muestra) dispuesta a lo largo del borde de ataque de la protección 70 contra la erosión, en una dirección paralela a la dirección longitudinal de la protección 70. Dicha línea de desgarramiento longitudinal predefinida puede permitir la delaminación o desprendimiento relativamente fácil de la capa más externa del material 72 resistente a la erosión, cuando el viento venidero actúa para forzar los extremos libres de la capa externa adyacentes al punto de ruptura lejos del borde de ataque.

- Se comprenderá que dichas secciones debilitadas se proporcionan preferiblemente dentro de las capas del material 74 de puntal, de manera que las propiedades resistentes a la erosión de las capas de material 72 resistente a la erosión no se ven afectadas por su presencia. Las secciones debilitadas se pueden formar durante el proceso de fabricación como una sección intencionalmente debilitada, por ejemplo una sección de espesor reducido, o las secciones debilitadas se pueden formar a través de una operación de tratamiento de postproducción, por ejemplo una operación de perforación o puntuación en una porción de la protección contra la erosión.
- Una realización alternativa adicional de una protección contra la erosión de acuerdo con la invención se ilustra en la Figura 7. De forma similar a la realización de la Figura 4, la protección 70 contra la erosión de la Figura 7 comprende una estructura intercalada de capas de material 72 resistente a la erosión y un material 74 de puntal dispuesto para unirse a un borde de ataque de una pala de turbina eólica. En la realización de la Figura 7, se define una cavidad o canal 82 en las capas de material 74 de puntal, dicha cavidad o canal 82 situado en el punto central de la capa de material 74 de puntal a lo largo del borde de ataque de la protección 70, y se extiende en una dirección paralela a la dirección longitudinal de la protección 70.
- El canal 82 está dispuesto preferiblemente contra la cara inferior de la capa externa adyacente del material 72 resistente a la erosión, y asegura que la capa externa del material 72 resistente a la erosión no está unida a la capa subyacente del material 74 de puntal a lo largo del borde de ataque de la protección 70 contra la erosión.
- Como resultado, una vez que la capa externa del material 72 resistente a la erosión se rompe o erosiona en el borde de ataque de la protección 70, las porciones de la capa 72 no unidas al material 74 de puntal subyacente se delaminarán o despegarán inmediatamente de la protección 70, presentando extremos libres que aletean del material 72 resistente a la erosión. Esto puede dar como resultado una delaminación más rápida de la capa 72 externa, ya que el viento venidero puede actuar sobre una zona mayor de la cara inferior de la capa 72 externa para desprenderse la capa externa y la capa 74 de puntal subyacente.
- La cavidad o canal 82 puede ser una abertura pasante que se extiende a través de cada capa completa de material 74 de puntal, o puede ser una indentación superficial en la superficie de la capa de material 74 de puntal que hace tope con la capa externa adyacente de material 72 resistente a la erosión.
- Se entenderá que el ancho del canal 82 puede ser de cualquier dimensión adecuada. A la vez que la realización de la Figura 7 muestra la cavidad 82 como definida en el borde de ataque, se entenderá que la cavidad puede extenderse a través de una mayor parte de las capas 74 de puntal.
- Por ejemplo, con referencia a la Figura 8, en una posible realización de la protección 70 contra la erosión de acuerdo con la invención, capas sucesivas de material 72 resistente a la erosión pueden unirse entre sí mediante una capa 74 de puntal adhesiva que se proporciona en lados opuestos de la protección 70 contra la erosión. En dicho caso, la capa 74 de material de puntal puede comprender primera y segunda cintas adhesivas, indicadas en 74a, 74b dispuestas en los lados respectivos de la protección 70 contra la erosión entre capas sucesivas de material 72 resistente a la erosión, concretamente en el lado 84 de succión superior y el lado 86 de presión inferior de la protección 70 contra la erosión.
- Se entenderá que la cavidad 82 y/o la sección debilitada que se extiende en una dirección longitudinal a lo largo de la protección 70 contra la erosión podrían no estar provistas a lo largo del borde de ataque de la protección 70 contra la erosión, por ejemplo, puede extenderse a lo largo de una línea correspondiente a un área prevista de ruptura inicial de la capa 72 más externa resistente a la erosión.
- Se comprenderá además que las capas 72, 74 de la protección contra la erosión pueden estar formadas por diversos tipos de materiales compuestos que tienen diferentes propiedades mecánicas. Por ejemplo, el material 72 resistente a la erosión puede comprender una composición de material elástico en el borde de ataque de la protección 70 contra la erosión, pero puede formarse gradualmente a partir de una composición que tiene propiedades mecánicas flexibles adyacentes al borde de ataque, siendo así más flexible y más fácil de delaminar una vez que la porción de la capa en el borde de ataque se ha roto.
- Se proporciona además una pala 10 de turbina eólica que tiene una protección 70 contra la erosión como se describe en cualquiera de las realizaciones anteriores, y una turbina eólica que tiene al menos una de dichas palas 10 de turbina eólica. En una realización preferida, la pala 10 de turbina eólica está dispuesta de manera que un canal (no se muestra) está definido en el cuerpo de la pala 10 a lo largo del borde 56 de ataque de la pala 10, la profundidad del canal está configurada de manera que la superficie 70a expuesta exterior de la protección 70 contra la erosión está al ras con las superficies expuestas adyacentes de la pala 10 de turbina eólica. En consecuencia, las propiedades aerodinámicas de la pala 10 no se ven afectadas significativamente mediante el uso de dicha protección 70 contra la erosión en capas.

5 La protección 70 contra la erosión que se describe aquí presenta un sistema mejorado resistente a la erosión sobre la técnica anterior. La delaminación dinámica de capas sucesivas de la protección contra la erosión bajo la acción del viento una vez que la capa externa se erosiona o rompe proporciona una mayor vida útil de la protección contra la erosión y un mayor tiempo entre operaciones de mantenimiento, reparación y reemplazo, con un impacto mínimo en el rendimiento aerodinámico debido a la erosión parcial de la protección.

Se entenderá que las figuras que se muestran son puramente ilustrativas y las características que se muestran, por ejemplo los grosores de las capas, las formas, la dirección del viento, etc., no están a escala.

La invención no está limitada a la realización descrita aquí, y puede modificarse o adaptarse sin apartarse del alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Una protección contra la erosión para una pala de turbina eólica, teniendo la protección contra la erosión una superficie externa expuesta en un borde de ataque de la pala de turbina eólica caracterizado porque la protección contra la erosión comprende:
 - 5 una pluralidad de capas de material (72) resistente a la erosión, dicha pluralidad de capas dispuestas en una pila a partir de una capa más externa que forma sustancialmente dicha superficie externa a una capa más interna dispuesta para unirse a un borde (56) de ataque de una pala de turbina eólica, dicha pluralidad de capas unidas a capas adyacentes en la pila,
 - 10 en donde dicha pluralidad de capas de material resistente a la erosión tiene una resistencia cohesiva o resistencia a la tracción mayor que la resistencia adhesiva o resistencia de unión entre capas adyacentes o subsecuentes, de modo que al menos una sección de una capa expuesta más externa se delaminará o despegará de dicha protección contra la erosión bajo la acción del viento cuando al menos una parte de dicha sección de dicha capa más exterior expuesta se ha erosionado o roto, para presentar una superficie externa relativamente lisa de dicha protección contra la erosión.
 - 15 2. La protección contra la erosión de acuerdo con la reivindicación 1, en donde dicha pluralidad de capas está unida de manera adhesiva a capas adyacentes en la pila, y en donde dicha pluralidad de capas de material resistente a la erosión tiene una resistencia cohesiva mayor que la resistencia de unión adhesiva entre capas adyacentes.
 3. La protección contra la erosión de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde dichas capas de material resistente a la erosión comprenden una superficie interna que se aleja de la superficie externa de la protección contra la erosión y una superficie exterior orientada hacia la superficie externa de la protección contra la erosión,
 - 20 en donde dicha protección contra la erosión comprende además al menos una capa de material de puntal localizado entre capas adyacentes de material resistente a la erosión para unir superficies internas y externas adyacentes de capas adyacentes de material resistente a la erosión en dicha pila.
 4. La protección contra la erosión de la reivindicación 3, en donde dicha al menos una capa de puntal comprende una capa de adhesivo.
 - 25 5. La protección contra la erosión de la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en donde dicha al menos una capa de puntal tiene una resistencia cohesiva a la tracción menor que la resistencia cohesiva a la tracción de dichas capas de material resistente a la erosión.
 6. La protección contra la erosión de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en donde dicha al menos una capa de material de puntal tiene una unión relativamente más fuerte a una superficie interna adyacente de una capa de material resistente a la erosión que a una superficie exterior adyacente de una capa de material resistente a la erosión.
 - 30 7. La protección contra la erosión de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en donde se define un límite entre secciones adyacentes de dichas capas de material resistente a la erosión, por una línea o tira perforada en al menos una de dichas capas de material resistente a la erosión o al menos una de dichas capas de material de puntal, preferiblemente en dichas capas de material de puntal.
 - 35 8. La protección contra la erosión de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, en donde la protección contra la erosión puede comprender una sección perforada, debilitada, ranurada o frágil dispuesta en una dirección longitudinal paralela al borde de ataque de la protección contra la erosión.
 9. La protección contra la erosión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 8, en donde una cavidad o canal está definido en dichas capas de material de puntal, dicho canal o cavidad dispuesto adyacente al lado inferior
 - 40 de la superficie interna de la capa externa adyacente de material resistente a la erosión, preferiblemente en el borde de ataque de la protección contra la erosión.
 10. La protección contra la erosión de una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 9, en donde dicha al menos una capa de material de puntal tiene aproximadamente 0.05-0.25 mm de profundidad, preferiblemente 0.1 mm de profundidad.
 - 45 11. La protección contra la erosión de cualquier reivindicación precedente, en donde dichas capas de material resistente a la erosión tienen aproximadamente 0.1 0.5 mm de profundidad, preferiblemente 0.3 mm de profundidad.
 12. La protección contra la erosión de cualquier reivindicación precedente, en donde dicha protección contra la erosión está dispuesta para extenderse en una dirección longitudinal a lo largo de una porción del borde de ataque de una pala de turbina eólica, y en donde dichas capas de material resistente a la erosión están divididas en una pluralidad de secciones a lo largo de la longitud de la protección contra la erosión, en donde dichas secciones de dichas capas

resistentes a la erosión están dispuestas para delaminarse individualmente cuando al menos una porción de una capa resistente a la erosión dentro de una sección particular se ha erosionado o roto.

13. Una pala de turbina eólica que tiene una protección contra la erosión de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

5 14. Una pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 13, en donde la pala de turbina eólica comprende un canal formado en el borde de ataque de la pala, dicho canal para recibir dicha protección contra la erosión de manera que la protección contra la erosión esté al ras de las superficies de la pala adyacente a la protección contra la erosión.

15. Una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 13 o la reivindicación 14.

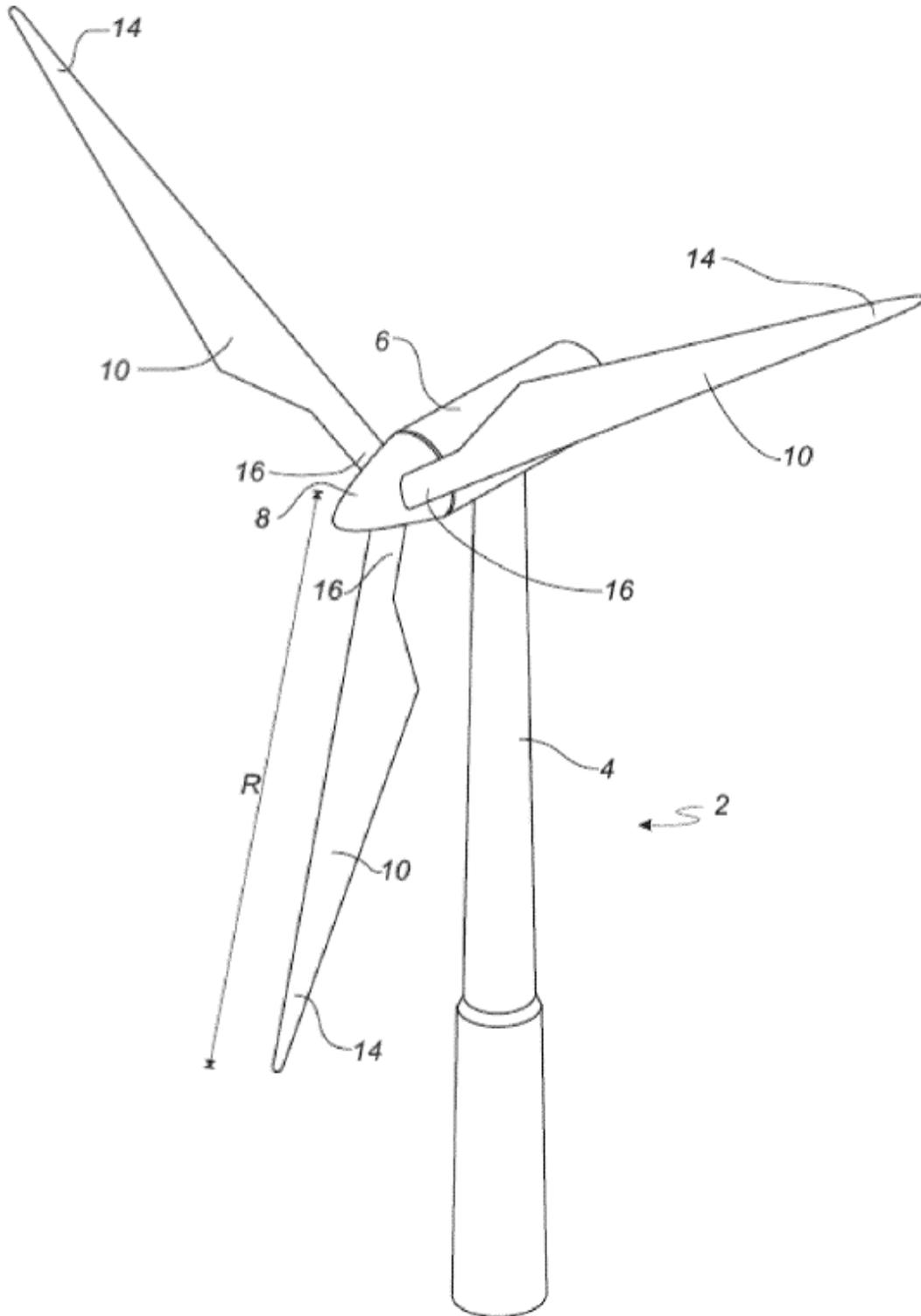


Fig. 1

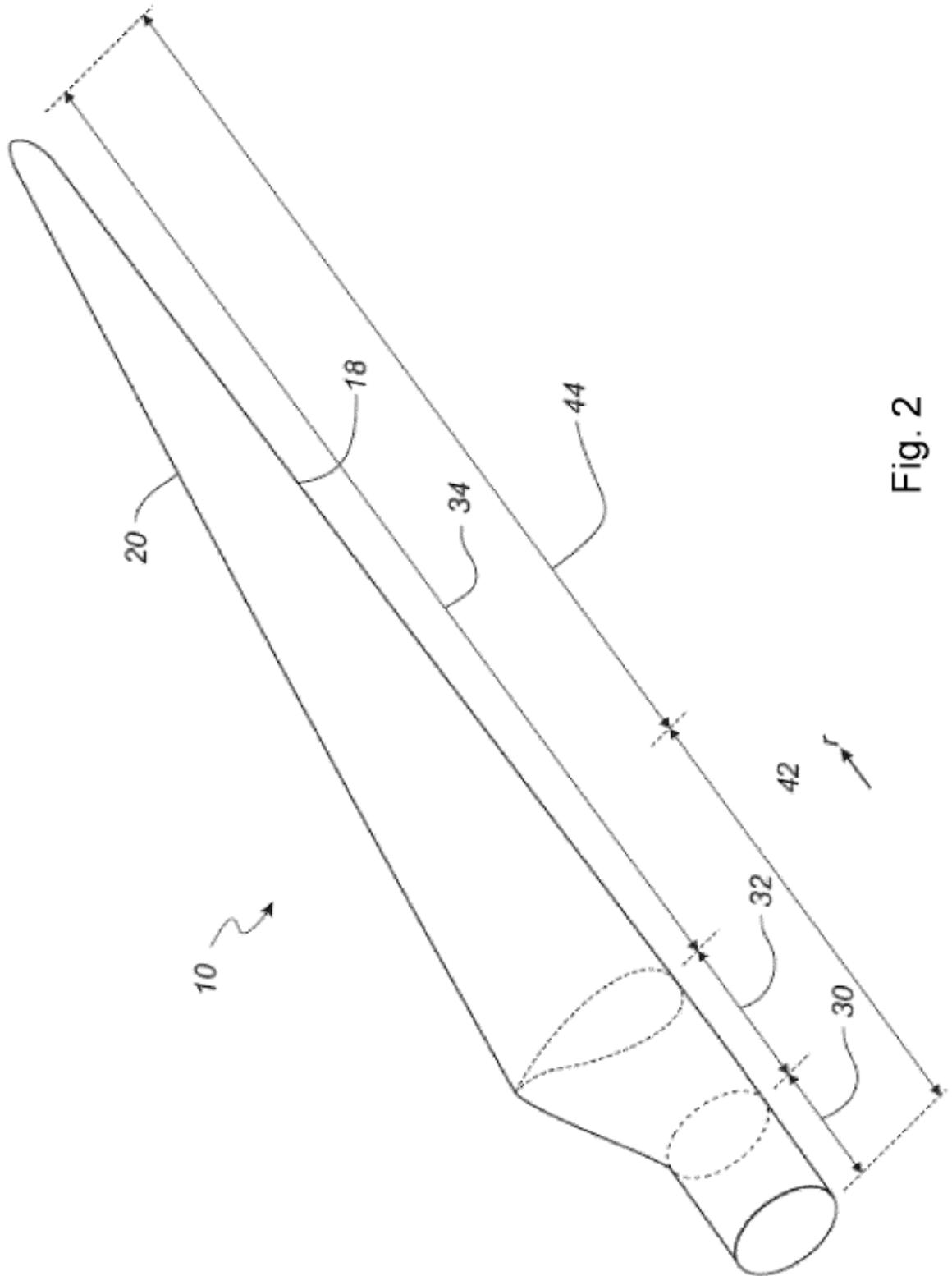


Fig. 2

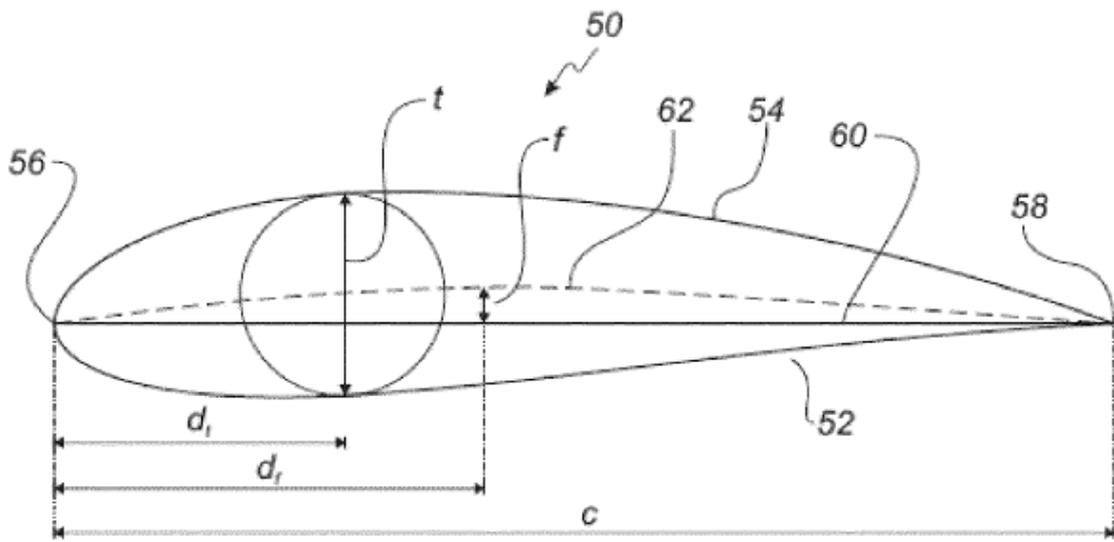


Fig. 3

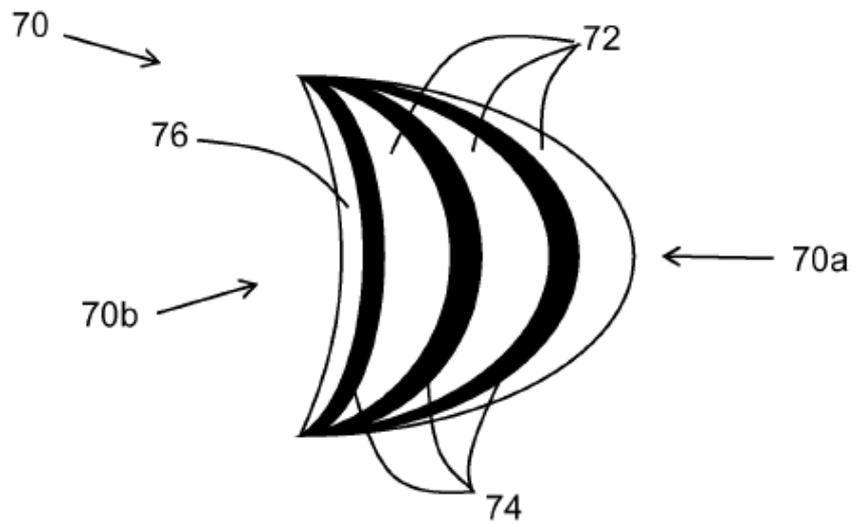


Fig. 4

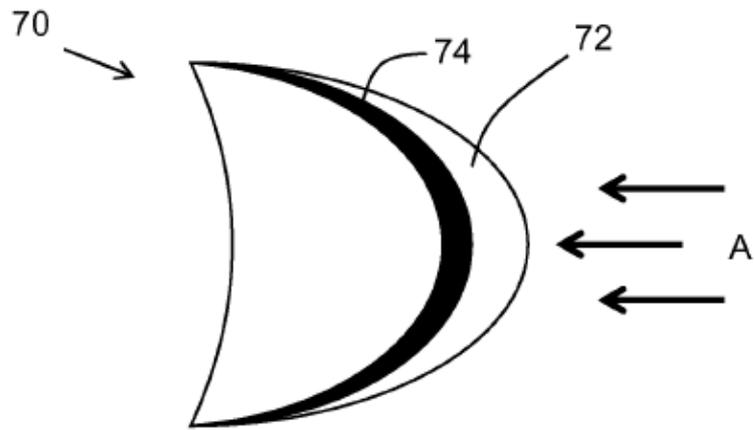


Fig. 5(a)

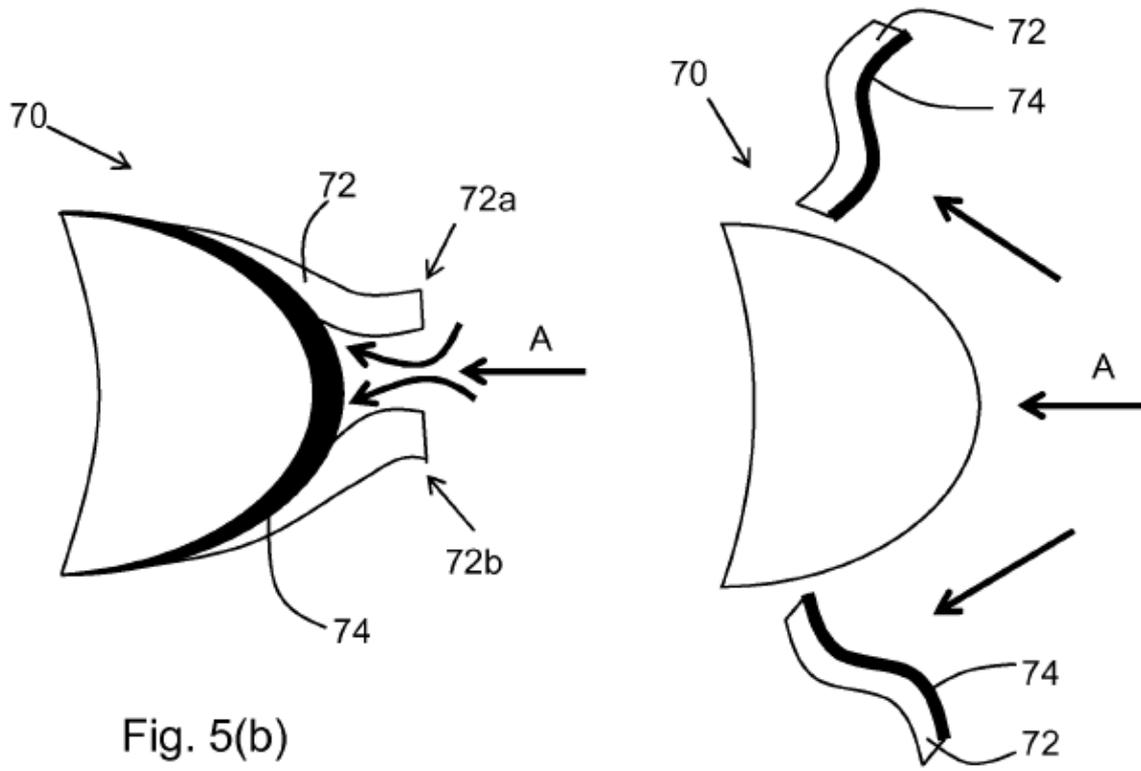


Fig. 5(b)

Fig. 5(c)

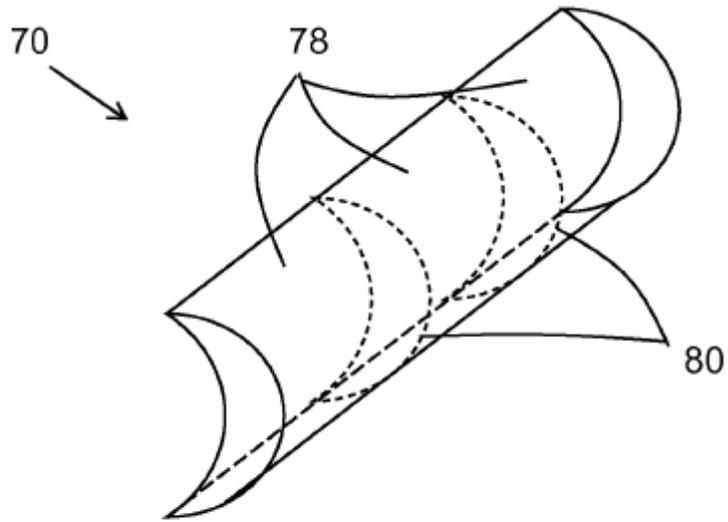


Fig. 6

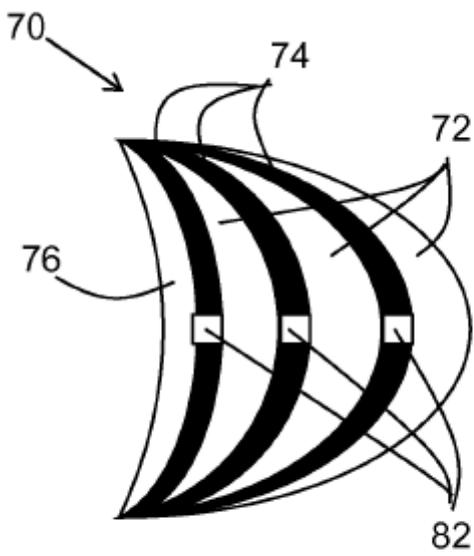


Fig. 7

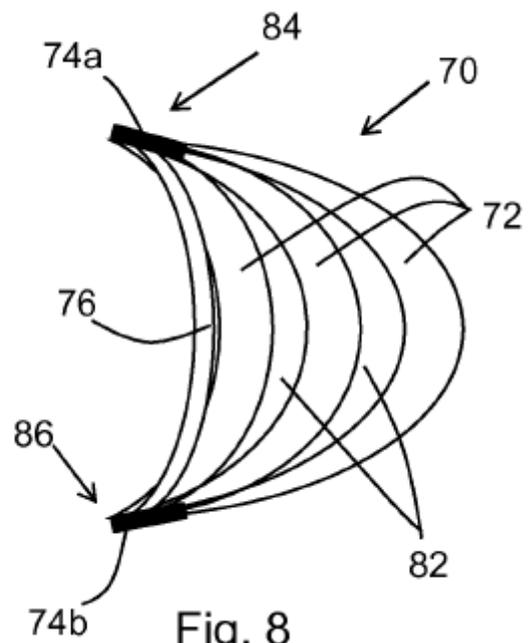


Fig. 8