

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 724 536**

51 Int. Cl.:

**B29C 37/00** (2006.01)

**B29C 35/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.11.2013** **E 13192582 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.02.2019** **EP 2732949**

54 Título: **Metalización en molde de estructuras compuestas**

30 Prioridad:

**15.11.2012 US 201213678525**

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

**11.09.2019**

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)  
100 North Riverside Plaza  
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**GHABCHI, ARASH;  
THOMPSON, ALAN y  
FRONING, MARC J**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 724 536 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**

Metalización en molde de estructuras compuestas

**Campo**

5 La presente divulgación se refiere, en general, a revestimientos metálicos y, más particularmente, a un sistema y un método para aplicar un revestimiento de superficie a un artículo compuesto.

**Antecedentes**

10 Se usan estructuras compuestas en una amplia variedad de aplicaciones. En la construcción de aeronaves, se usan cada vez más materiales compuestos para formar el fuselaje, las alas, y otros componentes de una aeronave. Durante la vida útil de una aeronave, las alas se ven expuestas a una variedad de efectos medioambientales. Por ejemplo, durante el vuelo cuando la aeronave se mueve hacia adelante a alta velocidad, el borde delantero de las alas puede verse sometido a impactos por la lluvia y otras formas de humedad. Además, la aeronave que incluye las alas puede verse sometida a impactos de rayos.

15 Métodos convencionales para proteger un borde delantero compuesto frente a un impacto de lluvia incluyen sujetar una tira metálica protectora sobre el borde delantero. Desafortunadamente, la unión de una tira metálica a un ala compuesta es un procedimiento que consume mucho tiempo y es intensamente laborioso que requiere una gran cantidad de elementos de sujeción mecánicos. La gran cantidad de elementos de sujeción puede añadirse al peso global de la aeronave. Además, pueden requerirse herramientas especializadas para mantener la posición de la tira metálica durante la instalación. Además, los elementos de sujeción que se instalan a través de la superficie de línea de molde exterior (OML) del borde delantero pueden interrumpir el flujo de aire que pasa sobre la superficie de OML.  
20 La interrupción en el flujo de aire puede provocar que el flujo de aire sobre el ala se vuelva turbulento dando como resultado un aumento en la resistencia aerodinámica y una correspondiente reducción en la eficacia de combustible de aeronave.

25 Además, puede conformarse material metálico tal como una lámina metálica, en general, con una forma de única curvatura flexionando la lámina metálica usando herramientas relativamente económicas. Sin embargo, el borde delantero de un ala puede tener una o más regiones de curvatura compuesta a lo largo de la longitud del borde delantero. El procedimiento de formación de una tira de erosión metálica que coincida con la curvatura compuesta de un borde delantero de ala puede requerir equipos de formación de metal complejos que pueden añadirse al coste y complejidad globales del conjunto de ala.

30 El documento GB20544448 da a conocer un cuerpo moldeado, que tiene un revestimiento de superficie y un cuerpo de material de plástico que tiene un punto de fusión inferior al del revestimiento, (por ejemplo, metal, óxido o carburo). El cuerpo moldeado se realiza mediante la introducción del material de plástico en un molde sobre la cara de molde resistente al calor, a la que se ha aplicado previamente el agente de revestimiento para formar una capa que puede combinarse indirectamente con el cuerpo de plástico. El revestimiento de la cara de molde se realiza mediante pulverización térmica del material de revestimiento con la cara de molde a una temperatura considerablemente inferior  
35 a la temperatura del medio de revestimiento que impacta, y la posterior introducción del material de plástico en el molde se realiza como pronto tras el enfriamiento del material de revestimiento a la temperatura del material de plástico.

40 El documento EP0117838 da a conocer un método de moldeo por inyección para una resina sintética que tiene las superficies de un material inorgánico tal como un metal, que comprende las etapas de pulverizar previamente el material inorgánico sobre la superficie de moldeo de un molde con el fin de formar una capa de material inorgánico en la misma, y moldear por inyección la resina sintética para asociarla por completo con la capa de material inorgánico. La pulverización del material inorgánico se logra bajo condiciones de pulverización controladas para aumentar la dureza en la superficie de la capa de material inorgánico que está en contacto con la resina sintética y para, de ese modo, dotar a la resina sintética de un efecto de anclaje.

45 Con respecto a la protección frente a impactos de rayos, los materiales compuestos tienen, en general, una baja conductividad eléctrica con capacidad limitada para disipar la energía eléctrica de un impacto de rayo. Las láminas metálicas montadas en la superficie de una estructura compuesta pueden proporcionar cierta protección en caso de producirse un impacto de rayo disipando la energía eléctrica. Desafortunadamente, el montaje de láminas metálicas sobre la superficie de un ala compuesta para la protección frente a rayos puede implicar las mismas desventajas asociadas con el montaje de una tira metálica sobre el borde delantero de ala para la protección frente a erosión.  
50

Tal como puede observarse, existe una necesidad en la técnica de un método de suministro de una capa metálica sobre una superficie compuesta sin la necesidad de sujetar mecánicamente una lámina metálica independiente al artículo compuesto. Además, existe una necesidad en la técnica de un método de suministro de una capa metálica sobre una superficie de curvatura compuesta que evite la necesidad de usar equipos de formación de metal complejos.  
55 Además, existe una necesidad en la técnica de un método de suministro de una capa metálica que pueda proteger una estructura compuesta contra los efectos de erosión, impacto de rayos, y otros efectos.

**Sumario**

Las necesidades anteriormente mencionadas asociadas con métodos de la técnica anterior para proporcionar una capa metálica sobre una superficie compuesta están dirigidas de manera específica y mitigadas por la presente divulgación que proporciona un método de formación de un revestimiento de superficie sobre un artículo compuesto.

5 Según la presente invención se proporciona un método de formación de un revestimiento de superficie sobre un artículo compuesto tal como se reivindica en las reivindicaciones adjuntas.

El método incluye aplicar una pulverización térmica a una superficie de herramienta de una herramienta de una manera tal como para formar el revestimiento de superficie con una unión liberable con la superficie de herramienta. El método incluye además aplicar material compuesto sobre el revestimiento de superficie, curar el material compuesto para formar un artículo compuesto curado, y retirar el artículo compuesto curado de la herramienta de manera que libera el revestimiento de superficie de la superficie de herramienta y retiene el revestimiento de superficie con el artículo compuesto curado.

10

El método puede proporcionar la metalización en molde de un artículo compuesto. El método incluye aplicar una primera pulverización térmica a una superficie de herramienta de una herramienta de una manera tal como para formar una porción de revestimiento de lado de herramienta que tiene una unión liberable con la superficie de herramienta. El método también incluye aplicar una segunda pulverización térmica a la porción de revestimiento de lado de herramienta de una manera tal como para formar una porción de revestimiento de lado de parte que esté unida de manera permanente a la porción de revestimiento de lado de herramienta. Además, el método puede incluir someter a cámara de vacío el material compuesto, reducir una viscosidad de resina en el material compuesto de tal manera que la resina se infundiona con la porción de revestimiento de lado de parte, y curar el material compuesto a una temperatura predeterminada y a una presión predeterminada para producir un artículo compuesto curado que esté unido de manera permanente a la porción de revestimiento de lado de parte. El método puede incluir además sacar de la cámara de vacío el artículo compuesto curado, y retirar el artículo compuesto curado de la herramienta de manera que la porción de revestimiento de lado de herramienta se libera de la superficie de herramienta y se retiene con la porción de revestimiento de lado de parte en el artículo compuesto curado.

15

20

25

Las características, funciones y ventajas que se han comentado pueden lograrse de manera independiente en diversas realizaciones de la presente divulgación o pueden combinarse en aún otras realizaciones, cuyos detalles adicionales pueden observarse con referencia a la siguiente descripción y dibujos a continuación.

**Breve descripción de los dibujos**

30 Estas y otras características de la presente divulgación serán más evidentes tras hacer referencia a los dibujos en los que números similares se refieren a partes similares en la totalidad del documento y en los que:

la figura 1 es una vista en perspectiva de una aeronave;

la figura 2 es una vista en sección de una porción del ala compuesta tomada a lo largo de la línea 2 de la figura uno y que ilustra un revestimiento de superficie metálico aplicado sobre un borde delantero de un recubrimiento de ala compuesta;

35

la figura 3 es una vista lateral esquemática de una herramienta que tiene una superficie de herramienta sobre la que puede aplicarse un revestimiento de superficie durante un procedimiento *in situ* para la metalización en molde de un artículo compuesto;

la figura 4 es una vista lateral esquemática de la herramienta que ilustra la aplicación de una primera pulverización térmica para formar una porción de revestimiento de lado de herramienta sobre la superficie de herramienta durante el procedimiento de metalización en molde para formar el revestimiento de superficie sobre un artículo compuesto;

40

la figura 5 es una vista lateral esquemática de la herramienta que ilustra la aplicación de una segunda pulverización térmica para formar una porción de revestimiento de lado de parte sobre la porción de revestimiento de lado de herramienta durante el procedimiento de metalización en molde para formar el revestimiento de superficie sobre un artículo compuesto;

45

la figura 6 es una vista lateral esquemática de la aplicación de material compuesto sobre la porción de revestimiento de lado de parte durante el procedimiento de metalización en molde para formar el revestimiento de superficie sobre un artículo compuesto;

la figura 7 es una ilustración en sección transversal del revestimiento de superficie que comprende una porción de revestimiento de lado de herramienta lisa, densa adherida de manera liberable a la superficie de herramienta y teniendo la porción de revestimiento de lado de parte porosa una textura de superficie relativamente rugosa para unirse con una capa de resina epoxi del artículo compuesto;

50

- la figura 8 es una vista lateral esquemática de la retirada del artículo compuesto curado de la herramienta y una manera de modo que la porción de revestimiento de lado de herramienta se libera de la superficie de herramienta y se retiene con la porción de revestimiento de lado de parte en el artículo compuesto curado;
- 5 la figura 9A es una vista esquemática desde arriba de un instrumento de medición de curvatura durante una fase de precalentamiento y en la que el instrumento de medición de curvatura incluye un sustrato sobre el que puede aplicarse un revestimiento para medir parámetros de procedimiento tal como pueden usarse en el cálculo de tensión residual en el revestimiento;
- 10 la figura 9B es una vista esquemática desde arriba del instrumento de medición de curvatura durante un paso de adhesión inicial mediante un dispositivo de pulverización térmica para aplicar una capa inicial del revestimiento sobre el sustrato;
- la figura 9C es una vista esquemática desde arriba del instrumento de medición de curvatura que ilustra una tensión residual que evoluciona en el revestimiento durante la aplicación de capas posteriores del revestimiento;
- la figura 9D es una vista esquemática desde arriba del instrumento de medición de curvatura que ilustra una fase de enfriamiento o se permite que en el sustrato y el revestimiento se enfríen a temperatura ambiente;
- 15 la figura 10A es un gráfico que representa la curvatura de sustrato y la temperatura de revestimiento con respecto a tiempo durante la fase de precalentamiento;
- la figura 10B es un gráfico que representa la curvatura de sustrato y la temperatura de revestimiento con respecto a tiempo durante el paso de adhesión inicial;
- 20 la figura 10C es un gráfico que representa la curvatura de sustrato y la temperatura de revestimiento con respecto a tiempo durante la etapa de tensión residual que evoluciona;
- la figura 10D es un gráfico que representa la curvatura de sustrato y la temperatura de revestimiento con respecto a tiempo durante la fase de enfriamiento;
- la figura 11 es un diagrama de flujo que tiene una o más operaciones que pueden incluirse en un método para formar una porción de tubo;
- 25 la figura 12 es un diagrama de flujo de un servicio de aeronave y método de producción; y
- la figura 13 es un diagrama de bloques de una aeronave.

### Descripción detallada

30 Haciendo referencia ahora a los dibujos en los que lo que se muestra es con fines de ilustrar diversas realizaciones de la presente divulgación, en la figura 1, se muestra una aeronave 100 que tiene un fuselaje 102 que se extiende desde un morro 104 hasta un empenaje 106 de la aeronave 100. El empenaje 106 puede incluir una o más superficies de cola tales como un estabilizador 108 horizontal, un estabilizador 110 vertical, y uno o más superficies de control móviles para realizar el control de dirección de la aeronave 100. La aeronave 100 puede incluir además un par de alas 114, teniendo cada una un borde 118 delantero y un borde trasero e incluyendo, opcionalmente, un dispositivo 116 de punta de ala. La aeronave 100 puede incluir además una o más unidades 112 de propulsión que pueden estar montadas a las alas 114.

35 Haciendo referencia a la figura 2, la aeronave 100 puede incluir una o más estructuras 152 compuestas tal como las alas 114 que pueden estar formadas por materiales 156 compuestos. Por ejemplo, cada ala 114 puede estar comprendida por paneles de recubrimiento compuestos y puede incluir elementos de rigidización internos tales como tirantes y/o nervaduras que también pueden estar formados por material 156 compuesto y que pueden aumentar la resistencia y rigidez del ala 114 y mantener la forma aerodinámica del ala 114. Ventajosamente, una o más estructuras 152 compuestas de la aeronave 100 pueden estar dotadas de un revestimiento 256 de superficie tal como el revestimiento 256 de superficie que puede aplicarse al borde 118 delantero del ala 114 o el dispositivo 116 de punta de ala tal como se muestra en la figura 2.

40 Tal como se muestra en las figuras 3-8 y se describe a continuación, el revestimiento 256 de superficie puede formarse sobre la estructura 152 compuesta usando un procedimiento o método de revestimiento en molde tal como se da a conocer en el presente documento en el que un revestimiento 256 de superficie puede aplicarse como una pulverización térmica sobre al menos una porción de una superficie 302 de herramienta de una herramienta 300 que puede estar configurada para curar la estructura 152 compuesta. Tras pulverizar térmicamente el revestimiento en la superficie 302 de herramienta, el material 156 compuesto puede aplicarse sobre el revestimiento 256 de superficie

45 como parte de un procedimiento habitual para estratificar material 156 compuesto. El material 156 compuesto puede curarse para formar un artículo 150 compuesto curado.

Ventajosamente, el revestimiento 256 de superficie se aplica a la herramienta 300 de tal manera que el revestimiento 256 de superficie se libera de la superficie 302 de herramienta y se retiene con el artículo 150 compuesto curado

cuando el artículo 150 compuesto curado se retira de la herramienta 300. La liberación del revestimiento 256 de superficie de la superficie 302 de herramienta se logra formando el revestimiento 256 de superficie con una tensión 250 residual neta que es sustancialmente equivalente en magnitud a la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta entre el revestimiento 256 de superficie y la superficie 302 de herramienta. De esta manera, el revestimiento 256 de superficie puede permanecer adherido a la superficie 302 de herramienta durante la aplicación (por ejemplo, estratificación) del material 156 compuesto, y el revestimiento 256 de superficie se libera de la superficie 302 de herramienta y puede retenerse con el artículo 150 compuesto curado cuando el artículo 150 compuesto curado se retira de la herramienta 300, tal como se describe en mayor detalle a continuación.

El procedimiento de revestimiento en molde puede implementarse para aplicar revestimientos 256 de superficie de una variedad de materiales sobre una estructura 152 compuesta. Por ejemplo, el procedimiento de revestimiento en molde puede implementarse para aplicar un revestimiento 256 de superficie metálico a una estructura 152 compuesta. Además, el procedimiento de revestimiento en molde dado a conocer en el presente documento puede implementarse para aplicar un revestimiento 256 de superficie cerámico a un artículo 150 compuesto, o para aplicar una variedad de materiales de revestimiento alternativos. Además, el procedimiento de revestimiento en molde puede implementarse para aplicar un revestimiento 256 de superficie a cualquier tipo de estructura 152, sin limitación, y no se limita a estructuras de aeronave.

Haciendo referencia a la figura 3, con referencia adicional al diagrama de flujo de la figura 11 que describe un método 500 de formación de un revestimiento 256 de superficie, en la figura 3 se muestra una vista lateral esquemática de una herramienta 300 que puede configurarse para curar un artículo 150 compuesto. La herramienta 300 mostrada en la figura 3 representa cualquiera de una variedad de diferentes tamaños, formas, contornos, y configuraciones de herramientas que pueden usarse para curar y/o consolidar el material 156 compuesto tal como una estratificación compuesta para formar un artículo 150 compuesto curado. La herramienta 300 puede formarse de un material compatible con el material 156 compuesto de consolidación y/o curación. Por ejemplo, la herramienta 300 puede formarse de un material con base de hierro tal como Invar o acero, o la herramienta 300 puede formarse de aluminio, o cualquier otro material que sea térmicamente compatible con el material 156 compuesto de curación.

La herramienta 300 puede incluir una superficie 302 de herramienta sobre la que puede aplicarse el revestimiento 256 de superficie. La herramienta 300 puede tener un grosor 304 de herramienta que puede derivar en parte por la magnitud de la presión de compactación que puede aplicarse sobre el material 156 compuesto contra la superficie 302 de herramienta durante la consolidación del material 156 compuesto. Sin embargo, debe observarse que el método de formación del revestimiento 256 de superficie dado a conocer en el presente documento no se limita a superficies 302 de herramienta de una herramienta 300 de consolidación o de curación. A este respecto, la superficie 302 de herramienta dada a conocer en el presente documento alberga cualquier superficie, sin limitación, sobre la que puede aplicarse un revestimiento seguido por la aplicación del material 156 compuesto sobre el revestimiento. La etapa 502 del método 500 (figura 11) puede incluir limpiar la superficie 302 de herramienta u otra superficie para retirar elementos contaminantes tales como suciedad, restos, fluido, humedad, condensación, lubricante, y cualquier otra superficie que pueda afectar de manera adversa al procedimiento de revestimiento en molde.

Haciendo referencia a la figura 4, la etapa 504 del método 500 (figura 11) puede incluir aplicar una pulverización térmica a una superficie 302 de herramienta para formar un revestimiento 256 de superficie sobre la superficie 302 de herramienta. La pulverización térmica puede aplicarse de tal manera que el revestimiento 256 de superficie forma una unión 226 liberable con la superficie 302 de herramienta. Tal como se describe en mayor detalle a continuación, tras aplicar la pulverización térmica a la superficie 302 de herramienta, el material 156 compuesto puede aplicarse sobre el revestimiento 256 de superficie como parte del procedimiento de estratificación habitual para formar un artículo compuesto. El material 156 compuesto puede entonces curarse en la herramienta 300 para formar un artículo 150 compuesto curado. Debido a la unión 226 liberable entre el revestimiento 256 de superficie y la superficie 302 de herramienta, el artículo 150 compuesto curado puede retirarse de la herramienta 300 en la que el revestimiento 256 de superficie se libera de la superficie 302 de herramienta y se retiene con el artículo 150 compuesto curado. Como resultado del procedimiento de aplicar la pulverización térmica tal como se describe a continuación, el revestimiento 256 de superficie se forma con una tensión 250 residual neta que es sustancialmente equivalente en magnitud a una resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta que permite la liberación del revestimiento 256 de superficie de la superficie 302 de herramienta cuando el artículo 150 compuesto curado se retira de la herramienta 300.

En una disposición, la pulverización térmica puede aplicarse como un único revestimiento para formar el revestimiento 256 de superficie sobre la superficie 302 de herramienta. El revestimiento 256 de superficie puede incluir una porción 212 de revestimiento de lado de herramienta y una porción 238 de revestimiento de lado de parte. La porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede aplicarse de manera que forma la unión 226 liberable con la superficie 302 de herramienta. La porción 238 de revestimiento de lado de parte puede aplicarse sobre la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. La pulverización térmica puede aplicarse de manera que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta tenga una textura 218 de superficie relativamente lisa y la porción 238 de revestimiento de lado de parte tenga una textura 244 de superficie más rugosa que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. La textura 244 de superficie rugosa puede facilitar la unión del material 156 compuesto a la porción 238 de revestimiento de lado de parte debido a la resina 162 del material 156 compuesto infundida con la

textura 244 de superficie rugosa de la porción 238 de revestimiento de lado de parte tal como se describe a continuación.

En una realización, la pulverización térmica se aplica como una primera pulverización 206 térmica y una segunda pulverización 236 térmica. La primera pulverización 206 térmica se aplica a la superficie 302 de herramienta para formar la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta sobre la superficie 302 de herramienta. La porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede aplicarse usando un dispositivo 200 de pulverización térmica tal como se muestra en la figura 4. En una realización, el dispositivo 200 de pulverización térmica está configurado como un dispositivo 202 de oxcombustible a alta velocidad. El dispositivo 202 de oxcombustible a alta velocidad puede emitir un penacho de partículas 208 de pulverización con parámetros de penacho a una temperatura 210 de pulverización relativamente baja y/o a una velocidad relativamente alta de las partículas 208 de pulverización. Por ejemplo, los parámetros de penacho del dispositivo 200 de pulverización térmica pueden ser de manera que la primera pulverización 206 térmica se aplica a una temperatura de entre aproximadamente 600-1400 grados Celsius y a una velocidad de partícula de entre aproximadamente 300-700 metros/segundo (m/s) aunque la primera pulverización 206 térmica puede pulverizarse a temperaturas y velocidades fuera de los intervalos anteriormente mencionados.

Al aplicar la primera pulverización 206 térmica a una velocidad relativamente alta, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede tener una textura 218 de superficie lisa en relación con la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta tal como se describe a continuación. Además, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede tener una porosidad 220 inferior que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta lo que puede aumentar la resistencia y durabilidad del revestimiento 256 de superficie. El método puede incluir adicionalmente formar la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta con una densidad 222 que es mayor que la densidad 248 de la porción 238 de revestimiento de lado de parte. A este respecto, el penacho de la primera pulverización 206 térmica puede incluir partículas 208 de pulverización tal como partículas de metal que pueden tener una densidad 222 que es mayor que la densidad 248 de las partículas 208 de pulverización en la segunda pulverización 236 térmica. La densidad 222 superior puede dotar a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta de una mayor fuerza, durabilidad, y resistencia a impacto mecánico que la porción 238 de revestimiento de lado de parte.

La dureza 218 de superficie inferior, la porosidad 220 inferior, y la densidad 222 superior de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta en relación con la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede potenciar la resistencia de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta a efectos mecánicos tales como la erosión. Además, la porosidad 220 inferior, y la densidad 222 superior de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta en relación con la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede mejorar la capacidad del revestimiento 256 de superficie para disipar energía eléctrica tal como procedente de un impacto de rayo sobre la estructura compuesta a la que puede aplicarse el revestimiento 256 de superficie. A este respecto, el revestimiento 256 de superficie puede aplicarse a la superficie compuesta de una estructura de aeronave tal como a una o más superficies de un fuselaje (no mostrado) o ala (no mostrada) para disipar energía eléctrica tal como procedente de un impacto de rayo.

En la figura 4, en una realización, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede formarse en un grosor 214 relativamente pequeño. Por ejemplo, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede formarse en un grosor 214 de entre aproximadamente 0,0127 y 2,54 mm (0,0005 y 0,10 pulgadas). En una realización, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede formarse en un grosor 214 de entre aproximadamente 0,0762 y 1,27 mm (0,003 y 0,050 pulgadas). Sin embargo, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede formarse en grosores fuera del intervalo 0,0127 - 2,54 mm (0,0005 - 0,10 pulgadas). Preferiblemente, el grosor 214 de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta se minimiza para minimizar el peso global del revestimiento 256 de superficie teniendo en consideración la densidad 222 superior de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta en relación con la densidad 248 inferior de la porción 238 de revestimiento de lado de parte. La textura 218 de superficie lisa de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta en relación con la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede potenciar la aerodinámica de la superficie exterior del revestimiento 256 de superficie y puede minimizar las interrupciones en el flujo de aire sobre el revestimiento 256 de superficie cuando se aplica a una superficie aerodinámica.

Tal como se indicó anteriormente, en disposiciones alternativas, el dispositivo 200 de pulverización térmica para aplicar la primera pulverización 206 térmica no se limita a un dispositivo 202 de oxcombustible a alta velocidad. A este respecto, el dispositivo 200 de pulverización térmica puede proporcionarse en cualquiera de una variedad de configuraciones de dispositivo de pulverización alternativas que incluyen un dispositivo de arco de alambre tal como un dispositivo 204 de arco de alambre doble del tipo que puede implementarse para aplicar la segunda pulverización 236 térmica tal como se describe a continuación. La primera pulverización 206 térmica también puede aplicarse usando un dispositivo de pulverización de plasma (no mostrado) u otros dispositivos de pulverización térmica.

En la figura 4, la superficie 302 de herramienta y la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta pueden definir una superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta. La primera pulverización 206 térmica puede incluir partículas 208 de pulverización que están formadas por un material y aplicarse a la superficie 302 de herramienta a una temperatura y velocidad que da como resultado una resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta. La resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta puede ser de manera que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta permanece adherida a

- la superficie 302 de herramienta durante la estratificación del material 156 compuesto, y se libera de la superficie 302 de herramienta durante la retirada del artículo 150 compuesto curado de la herramienta 300 sin dañar el artículo 150 compuesto (por ejemplo, sin delaminación, pelado, dañado de fibras, etc.). En una realización, la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta puede ser menor que la unión en una superficie 232 de contacto de revestimiento de parte tal como se comentó anteriormente. Además, la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta puede ser menor que una resistencia de unión (por ejemplo, resistencia de unión entre láminas) entre pliegos 154 compuestos (figura 8) del material 156 compuesto (figura 8) para evitar la delaminación de los pliegos 154 compuestos.
- Haciendo referencia a la figura 5, la etapa 506 del método 500 (figura 11) incluye aplicar una segunda pulverización 236 térmica a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta para formar una porción 238 de revestimiento de lado de parte. Tal como se indicó anteriormente, en una disposición, el revestimiento 256 de superficie puede formarse mediante pulverización térmica de un único revestimiento sobre la superficie 302 de herramienta de manera que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta tiene una textura 218 de superficie relativamente lisa, y la porción 238 de revestimiento de lado de parte tiene una textura 244 de superficie más rugosa para adherirse al material 156 compuesto tal como se describe a continuación. Sin embargo, según la presente invención el revestimiento 256 de superficie se forma mediante la aplicación de una segunda pulverización 236 térmica sobre una primera pulverización 206 térmica. A este respecto, el revestimiento 256 de superficie puede aplicarse a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta tras aplicar la primera pulverización 206 térmica a la superficie 302 de herramienta. El método puede incluir formar la porción 238 de revestimiento de lado de parte con una textura 244 de superficie que es más rugosa que la textura 218 de superficie de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta para mejorar la adhesión a la resina 162 del material 156 compuesto. La porción 238 de revestimiento de lado de parte también puede aplicarse con una porosidad 246 que puede ser mayor que la porosidad 220 de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta para reducir el peso de la porción 238 de revestimiento de lado de parte.
- La segunda pulverización 236 térmica puede aplicarse de tal manera que la porción 238 de revestimiento de lado de parte se une de manera permanente a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. Según la presente invención la segunda pulverización 236 térmica se aplica usando un dispositivo 204 de arco de alambre doble. El dispositivo 200 de pulverización térmica puede tener parámetros de penacho que afectan a la temperatura, la velocidad, y otros parámetros del penacho de partículas 208 de pulverización emitidos por el dispositivo de pulverización térmica. Por ejemplo, tales parámetros de penacho pueden incluir el tipo de combustible, agente oxidante, y gas portador de polvo para emitir las partículas 208 de pulverización desde el dispositivo 200 de pulverización térmica. Los parámetros de penacho pueden permitir aplicar la segunda pulverización 236 térmica a una temperatura 210 de pulverización relativamente alta y a una velocidad relativamente baja. Por ejemplo, el dispositivo 200 de pulverización térmica puede tener parámetros de penacho que permiten pulverizar la segunda pulverización 236 térmica a una temperatura de entre aproximadamente 1000-3500 grados Celsius y una velocidad de partícula de entre aproximadamente 50-600 m/s, aunque la segunda pulverización 236 térmica puede pulverizarse a temperaturas y velocidades fuera de los intervalos anteriormente mencionados. En disposiciones alternativas, la segunda pulverización 236 térmica también puede aplicarse usando un dispositivo de plasma (no mostrado) y/o un dispositivo 202 de oxicomcombustible a alta velocidad.
- Ventajosamente, la temperatura 210 de pulverización relativamente alta y la velocidad relativamente baja de la segunda pulverización 236 térmica puede dar como resultado que la porción 238 de revestimiento de lado de parte tenga una densidad 248 inferior, una porosidad 246 superior, y una textura 244 de superficie más rugosa que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. A este respecto, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede tener una superficie expuesta que tiene una textura 244 de superficie que es más rugosa que la textura 218 de superficie de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. La porosidad 246 superior de la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede reducir el peso global de la porción 238 de revestimiento de lado de parte. Además, la porosidad 246 superior de la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede facilitar la unión de la porción 238 de revestimiento de lado de parte con el material 156 compuesto tal como se describe a continuación. Además, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede estar formada, ventajosamente, con una densidad 248 inferior que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta teniendo en cuenta que la porción 238 de revestimiento de lado de parte no está expuesta a los efectos medioambientales (por ejemplo, erosión) al que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta está expuesta. La densidad 248 inferior de la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede minimizar el peso global del revestimiento 256 de superficie.
- En la figura 5, en una realización, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede formarse en un grosor 240 dentro del mismo intervalo que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. Por ejemplo, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede formarse en un grosor 240 de entre aproximadamente 0,0127 y 2,54 mm (0,0005 y 0,10 pulgadas), tal como en un grosor de entre aproximadamente 0,0762 y 1,24 mm (0,003 - 0,015 pulgadas). Sin embargo, tal como se indicó anteriormente con respecto a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede formarse en un grosor 240 fuera del intervalo 0,0127 y 2,54 mm (0,0005 a 0,10 pulgadas). La porción 238 de revestimiento de lado de parte puede ser más gruesa que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta porque la porción 238 de revestimiento de lado de herramienta de parte puede tener una porosidad 246 superior y una densidad 248 inferior que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta tal como se mencionó anteriormente. La combinación de la porción 212 de revestimiento de lado de

herramienta y la porción 238 de revestimiento de lado de parte define el grosor 254 de revestimiento de superficie. A este respecto, el revestimiento 256 de superficie puede proporcionarse en cualquier intervalo de grosores hasta aproximadamente 0,25 pulgadas o mayor. El grosor 254 de revestimiento de superficie puede controlarse para encontrarse dentro de aproximadamente 0,0127 mm (0,0005 pulgadas) lo que, ventajosamente, permite estrechar el grosor de revestimiento tal como sobre un borde 118 delantero de un recubrimiento de ala tal como se ilustra en la figura 2 o sobre una superficie de ala (no mostrada) tal como para la protección frente a rayos.

En la figura 5, la porción 238 de revestimiento de lado de parte y la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta pueden definir una superficie 230 de contacto de revestimiento-revestimiento que tiene una resistencia de adhesión que es mayor que la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta y mayor que la resistencia de adhesión en la superficie 232 de contacto de revestimiento de parte. A este respecto, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede formar una unión 234 no liberable con la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. La porción 238 de revestimiento de lado de parte y la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta pueden formarse de materiales sustancialmente similares. Sin embargo, la porción 238 de revestimiento de lado de parte y la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta pueden formarse de materiales diferentes que son complementarios entre sí. En la figura 5, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta y la porción 238 de revestimiento de lado de parte forman, de manera colectiva, el revestimiento 256 de superficie.

Haciendo referencia a la figura 6, la etapa 508 del método 500 (figura 11) incluye aplicar material 156 compuesto sobre la porción 238 de revestimiento de lado de parte tras aplicar la porción 238 de revestimiento de lado de parte a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. La aplicación de material 156 compuesto sobre la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede comprender la estratificación de pliegos 154 compuestos de material reforzado con fibras tal como material textil que puede impregnarse previamente con el material matriz (es decir, preimpregnado) o material de resina 162 tal como una matriz de resina epoxi termoendurecible o una matriz termoplástica. El refuerzo 160 con fibras puede proporcionarse en cualquiera de una variedad de diferentes configuraciones que incluyen, pero no se limitan a, material textil tejido, cinta unidireccional, fibras seccionadas, y otras configuraciones. La matriz puede comprender una matriz termoendurecible o una matriz termoplástica tal como se indicó anteriormente.

El material 156 compuesto no se limita al uso de material 156 compuesto preimpregnado y puede incluir un procedimiento de estratificación en húmedo para aplicar resina 162 para secar material reforzado con fibras. Por ejemplo, la aplicación del material 156 compuesto sobre la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede incluir la aplicación de material reforzado con fibras seco sobre la porción 238 de revestimiento de lado de parte seguido por la introducción de la matriz o el material de resina en la preforma de fibra seca usando cualquiera de una variedad de procedimientos de fusión de resina que incluyen, pero no se limitan a, infusión de película de resina (RFI), moldeo de transferencia de resina (RTM), y otros procedimientos de estratificación en húmedo.

En la figura 6, el material 156 compuesto y la porción 238 de revestimiento de lado de parte pueden definir una superficie 232 de contacto de revestimiento de parte en la que el material 156 compuesto y la porción 238 de revestimiento de lado de parte pueden unirse de manera permanente durante el curado del material 156 compuesto tal como se describe a continuación. El curado del material 156 compuesto puede incluir la etapa 510 del método 500 (figura 11) que comprende someter a cámara de vacío (no mostrado) el material 156 compuesto. Durante la operación de someter a cámara de vacío, una capa de liberación, una capa de respiro, otros materiales consumibles, y la cámara de vacío (no mostrada) puede aplicarse sobre el material 156 compuesto para sellar el material 156 compuesto a la superficie 302 de herramienta. Puede introducirse un vacío en la cámara de vacío para permitir la aplicación de presión de compactación (no mostrada) sobre el material 156 compuesto contra la superficie 302 de herramienta.

En la figura 6, la etapa 512 del método 500 (figura 11) puede incluir reducir una viscosidad de resina 162 de tal manera que la resina 162 se infundiona con la porción 238 de revestimiento de lado de parte. Por ejemplo, la viscosidad de resina 162 del material 156 compuesto puede reducirse elevando la temperatura de la resina 162 mediante cualquiera de una variedad de medios. Por ejemplo, la herramienta 300 puede colocarse en un horno autoclave o de convección para elevar la temperatura de la resina 162 y reducir la viscosidad de la misma. Alternativamente, la resina 162 puede calentarse de manera selectiva usando calentamiento por radiación. Para la resina 162 termoplástica, la viscosidad puede reducirse aumentando la temperatura de la resina 162 por encima de la temperatura de transición del vidrio. Al reducir la viscosidad de la resina 162, la resina 162 puede fluir, infundirse, y/o entremezclarse con la porción 238 de revestimiento de lado de parte.

En la figura 6, la etapa 514 del método 500 (figura 11) incluye curar el material 156 compuesto para producir un artículo 150 compuesto curado. El curado del material 156 compuesto puede dar como resultado una unión 234 no liberable o una unión permanente entre la porción 238 de revestimiento de lado de parte y la resina 162 del artículo 150 compuesto curado en la superficie 232 de contacto de revestimiento de parte. El curado del artículo 150 compuesto puede realizarse manteniendo el material 156 compuesto a una temperatura predeterminada y a una presión predeterminada durante un periodo de tiempo predeterminado para permitir la consolidación del material 156 compuesto. La temperatura puede reducirse entonces tal como a la temperatura ambiente para producir el artículo 150 compuesto curado. La resina 162 puede endurecerse o solidificarse en la superficie 232 de contacto de revestimiento de parte dando como resultado una unión permanente con la porción 238 de revestimiento de lado de

parte. En la figura 6, la etapa 516 del método 500 (figura 11) puede incluir sacar de la cámara de vacío el artículo 150 compuesto curado retirando la cámara de vacío (no mostrada) y/o materiales consumibles (no mostrados) tal como cualquier capa de liberación y/o capa de respiro.

5 Haciendo referencia a la figura 7, se muestra una sección transversal de un revestimiento 256 de superficie entre una superficie 302 de herramienta y un artículo 150 compuesto curado. El artículo 150 compuesto se muestra comprendido por un refuerzo 160 con fibras de carbono rodeado por material de resina 162. En la superficie 232 de contacto de revestimiento de parte, una capa de resina 162 se muestra enganchada a la porción 238 de revestimiento de lado de parte. Tal como puede observarse, la porción 238 de revestimiento de lado de parte tiene una composición 246 altamente porosa y una textura 244 de superficie relativamente rugosa debido a la temperatura relativamente alta y velocidad baja de las partículas 208 de pulverización emitidas por un dispositivo 204 de arco de alambre doble de pulverización 200 térmica. La textura 244 de superficie relativamente rugosa de la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede facilitar el infusinado y la unión de la resina 162 del material 156 compuesto con la porción 238 de revestimiento de lado de parte. La porosidad 246 relativamente alta puede reducir el peso global del revestimiento 256 de superficie y también puede facilitar la unión de la resina 162 a la porción 238 de revestimiento de lado de parte.

15 En la figura 7, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta se muestra teniendo una composición relativamente densa y una textura 218 de superficie relativamente lisa debido a la alta velocidad y a la temperatura relativamente baja de las partículas 208 de pulverización emitidas por un dispositivo 200 de pulverización térmica de oxcombustible 202 a alta velocidad tal como se indicó anteriormente. La composición de porosidad relativamente lisa, densa, y baja de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede facilitar la adhesión liberable de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta con la superficie 302 de herramienta. La combinación del grosor 240 de la porción 238 de revestimiento de lado de parte y la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta conforma el grosor total del revestimiento 256 de superficie.

25 Haciendo referencia a la figura 6, la etapa 518 del método 500 (figura 11) incluye retirar el artículo 150 compuesto curado de la herramienta 300. En una realización, el artículo 150 compuesto curado puede retirarse de la herramienta 300 aplicando una fuerza 310 externa sobre el artículo 150 compuesto curado tal como una fuerza axial para arrastrar el artículo 150 compuesto curado lejos de la superficie 302 de herramienta. Sin embargo, el artículo 150 compuesto curado también puede retirarse aplicando una fuerza de pelado en un borde (no mostrado) del revestimiento 256 de superficie. El artículo 150 compuesto curado también puede retirarse de la herramienta 300 aplicando una fuerza lateral en general paralela a la superficie 302 de herramienta tal como una fuerza de deslizamiento para deslizar el artículo 150 compuesto curado fuera de la superficie 302 de herramienta. A este respecto, la retirada del artículo 150 compuesto curado puede facilitarse por cualquier fuerza 310 externa que provoca que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta se libere de la superficie de herramienta y de manera que la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta se retiene con el revestimiento 256 de superficie sobre el artículo 150 compuesto curado.

35 Tal como se indicó anteriormente, la capacidad del revestimiento 256 de superficie para permanecer adherido de manera liberable a la superficie 302 de herramienta durante la aplicación de material 156 compuesto sobre el revestimiento 256 de superficie, y liberarse de la superficie 302 de herramienta bajo una fuerza 310 externa (por ejemplo, pelado desde una esquina o borde) aplicada al artículo 150 compuesto curado se logra formando el revestimiento 256 de superficie con una tensión 250 residual neta que es sustancialmente equivalente en magnitud a la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta entre el revestimiento 256 de superficie y la superficie 302 de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta. A este respecto, el revestimiento 256 de superficie puede tener una tensión 250 residual neta que es resultado de la tensión 216 residual en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta y la tensión 242 residual en la porción 238 de revestimiento de lado de parte.

45 En una realización adicional, el método puede incluir formar el revestimiento 256 de superficie teniendo en consideración la tensión 164 acumulada que puede generarse en el artículo 150 compuesto curado. Por ejemplo, la resina 162 y el refuerzo 160 con fibras del material 156 compuesto puede tener diferentes CTE que puede dar como resultado una tensión 164 acumulada residual en el artículo 150 compuesto curado tras el enfriamiento de la temperatura de curado a la temperatura ambiental o de ambiente. La primera pulverización 206 térmica y la segunda pulverización 236 térmica pueden aplicarse de manera que provocan la formación del revestimiento 256 de superficie con una tensión 250 residual neta que equilibra sustancialmente la tensión 164 acumulada en el artículo 150 compuesto curado de manera que la tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie es sustancialmente equivalente en magnitud a la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta.

55 Haciendo referencia a las figuras 9A-9D, se muestra un diagrama esquemático de una realización de un sistema para determinar la tensión residual en un revestimiento 422 aplicado a un sustrato 402 mediante pulverización térmica. El sistema puede proporcionar medios para evaluar el efecto de diferentes parámetros de procedimiento sobre la magnitud y la dirección (es decir, compresión, tracción) de la tensión residual en un revestimiento 422 tal como la tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie (figura 5), si se aplica como una única pulverización térmica, o se aplica como una primera pulverización 206 térmica (figura 4) y una segunda pulverización 236 térmica (figura 5). A este respecto, el sistema puede proporcionar medios para determinar los parámetros de procedimiento de pulverización térmica que pueden incorporarse en una única pulverización térmica, o los parámetros de procedimiento que pueden incorporarse en una primera pulverización 206 térmica (figura 4) y/o una segunda

pulverización 236 térmica (figura 5), con el fin de lograr una tensión residual deseada (figura 8) en el revestimiento 256 de superficie (figura 8) sobre un artículo 150 compuesto curado (figura 8).

5 Tales parámetros de procedimiento pueden incluir, pero no se limitan a, parámetros de pulverización y características de herramienta. Los parámetros de pulverización pueden incluir parámetros de penacho asociados con el dispositivo de pulverización térmica y pueden incluir el tipo de combustible, el agente oxidante, y el gas portador de polvo asociados con el penacho emitido por el dispositivo de pulverización térmica. Los parámetros de pulverización también pueden incluir características de materia prima de una materia prima introducida en el penacho o chorro emitidos por el dispositivo de pulverización térmica. Tales características de materia prima pueden incluir material de materia prima, material CTE, la distribución de tamaño de polvo, morfología de polvo, y una variedad de características de materia prima adicionales que pueden afectar la velocidad de pulverización en vuelo y/o la temperatura de pulverización del penacho de partículas 208 de pulverización. El grosor 254 de revestimiento puede representar un parámetro que puede afectar a la magnitud y la dirección de la tensión residual en el revestimiento. Tal como se indicó anteriormente, los parámetros de procedimiento también pueden incluir características de herramienta tales como el material de herramienta, el coeficiente 308 de expansión térmica (CTE) de herramienta, la superficie de acabado de herramienta, el grosor 304 de herramienta, la temperatura 306 de herramienta, y otras características de herramienta que pueden tener un efecto sobre la tensión residual (figura 8) en el revestimiento 256 de superficie (figura 8).

10 Haciendo referencia a la figura 6, el revestimiento 256 de superficie puede aplicarse a la herramienta 300 usando un conjunto de parámetros de procedimiento predeterminados que da como resultado una tensión 216 residual de una magnitud deseada y una dirección deseada en el revestimiento 256 de superficie. Si se aplica como una única pulverización térmica o, como en la presente invención, una combinación de una primera pulverización térmica, una segunda pulverización térmica, y/o pulverizaciones térmicas adicionales, el revestimiento 256 de superficie puede aplicarse usando un conjunto de parámetros de procedimiento predeterminados de manera que la tensión 216 residual de una magnitud deseada y una dirección deseada se forma en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. Del mismo modo, la porción 238 de revestimiento de lado de parte puede aplicarse a la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta usando un conjunto de parámetros de procedimiento predeterminado para lograr una magnitud deseada y una dirección de tensión 242 residual en la porción 238 de revestimiento de lado de parte. La tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie es el resultado de la tensión 242 residual en la porción 238 de revestimiento de lado de parte y la tensión 216 residual en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta. Los parámetros de procedimiento para la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta y la porción 238 de revestimiento de lado de parte pueden ajustarse hasta que la magnitud y la dirección de la tensión 216 residual en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta contrarreste o equilibre la tensión 242 residual en la porción 238 de revestimiento de lado de parte por una cantidad que provoca que la tensión 250 residual neta sea sustancialmente equivalente a la resistencia 224 de adhesión. Por ejemplo, para una configuración de herramienta dada (por ejemplo, forma de herramienta), puede ser deseable formar el revestimiento 256 de superficie sobre una superficie 302 de herramienta con una tensión 250 residual neta que sea compresiva de manera predominante para facilitar la retirada del artículo 150 compuesto curado de la herramienta 300. A este respecto, los parámetros de procedimiento de pulverización térmica pueden ajustarse hasta que se determine un conjunto de parámetros que dé como resultado la tensión 250 residual neta para que sea compresiva de manera predominante.

40 En la figura 9A, el sistema para evaluar los parámetros de procedimiento de pulverización térmica se muestra como un dispositivo 400 de medición de curvatura y puede implementarse para determinar la tensión residual en un revestimiento 422 usando un procedimiento dado a conocer en la patente estadounidense n.º 6.478.875 presentada por Sampath *et al.* El 12 de noviembre de 2002. El dispositivo 400 de medición de curvatura puede incluir un sustrato 402 que puede estar montado en extremos opuestos mediante un par de soportes 406 de sustrato. El sustrato 402 puede tener una superficie 408 de sustrato frontal y una superficie 410 de sustrato trasera que definen de manera colectiva un grosor de sustrato. El sustrato 402 puede comprender un elemento, en general, alargado y recto que, en una realización, puede estar formado por el mismo material del que puede estar formada la herramienta 300. El sustrato 402 puede tener un CTE 404 de sustrato. Uno o más dispositivos de láser pueden emitir haces 414 de láser para detectar el desplazamiento en uno o más puntos a lo largo del sustrato 402 como medio para calcular la curvatura del sustrato 438 y el grosor 254 de revestimiento en diferentes momentos durante el procedimiento de revestimiento.

50 En la figura 9A, pueden estar montados sensores 412 térmicos sobre la superficie 408 de sustrato frontal y sobre la superficie 410 de sustrato trasera para medir la temperatura de sustrato 402 y para medir la temperatura de revestimiento 436. Un dispositivo 418 de pulverización térmica puede emitir una pulverización térmica de partículas 420 de pulverización en un movimiento hacia delante y hacia atrás para formar el revestimiento 422 a lo largo de la superficie 408 de sustrato frontal. En la realización mostrada en las figuras 9A-9D, el dispositivo 418 de pulverización térmica puede estar configurado como un dispositivo 418 de pulverización de arco 204 de alambre doble para emitir artículos pulverizados a una velocidad relativamente baja y a una temperatura relativamente alta tal como se describió anteriormente. Sin embargo, el sistema puede emplear cualquier tipo de dispositivo de pulverización térmica.

60 Haciendo referencia a la figura 9A, se muestra una fase 416 de precalentamiento en la que el sustrato 402 no revestido puede calentarse para liberar la tensión del sustrato 402 de la tensión residual tal como puede dar como resultado a partir de proyección de granalla durante la limpieza del sustrato 402. El sustrato 402 puede precalentarse tal como usando un soplete o usando el dispositivo 418 de pulverización térmica sin emitir artículos pulverizados. Durante el precalentamiento, el sustrato 402 puede experimentar una curvatura 426 inicial debido a la liberación de tensión.

La figura 10A es un gráfico que representa la curvatura del sustrato 438 y la temperatura 436 de revestimiento durante la fase 416 de precalentamiento. El sustrato 402 comienza con una configuración generalmente recta y puede adoptar una ligera curvatura a medida que aumenta la temperatura del sustrato 402 tal como se muestra en la figura 10A.

5 La figura 9B ilustra el instrumento de medición de curvatura durante un paso 428 de adhesión inicial que comprende pulverizar o depositar el revestimiento 422 sobre la superficie 408 de sustrato frontal usando el dispositivo 418 de pulverización térmica. El dispositivo 418 de pulverización térmica puede emitir artículos pulverizados para formar la capa inicial del revestimiento 422. La extinción de las partículas 420 de pulverización a temperatura relativamente alta sobre la superficie 408 de sustrato frontal relativamente más fría da como resultado la curvatura del sustrato 438. El procedimiento incluye usar los dispositivos de láser anteriormente mencionados para medir el cambio en la curvatura del sustrato 438 en respuesta a la pulverización del revestimiento 422 sobre el sustrato 402 anteriormente mencionado.

La figura 10B es un gráfico que representa la curvatura del sustrato 438 y la temperatura 436 de revestimiento durante el paso 428 de adhesión inicial. El gráfico ilustra gráficamente el aumento en la curvatura del sustrato 438 como resultado de la tensión residual de compresión en el revestimiento 422 durante el paso de adhesión inicial.

15 La figura 9C muestra el aumento de curvatura del sustrato 402 durante una etapa 430 de tensión residual que evoluciona del revestimiento 422 durante el procedimiento de deposición debido a la aplicación continua de la pulverización térmica sobre el sustrato 402. La curvatura del sustrato 402 en la figura 9C puede representar un efecto 432 de extinción que comprende la extinción de las partículas 420 de pulverización tras el contacto con la superficie de sustrato 402 más fría y la superación de un efecto de granallado de las partículas 420 de pulverización sobre el sustrato 402 que se ve impactado por partículas 420 de pulverización adicionales que continúan emitiéndose por el dispositivo 418 de pulverización térmica.

20 La figura 10C es un gráfico que representa la curvatura del sustrato 438 y el aumento en la temperatura 436 de revestimiento durante la etapa 430 de tensión residual que evoluciona. La tensión 430 residual que evoluciona se produce en el revestimiento 422 debido a la aplicación de capas adicionales del revestimiento 422. La curvatura del sustrato 438 puede representar una acumulación de tensión de tracción en el revestimiento 422 durante la deposición sobre el sustrato 438.

La figura 9D muestra la curvatura inversa del sustrato 402 durante una fase 434 de enfriamiento. En la fase 434 de enfriamiento, el dispositivo 418 de pulverización térmica puede desactivarse y puede permitirse que el sustrato 402 y el revestimiento 422 se enfríen a temperatura ambiente o ambiental. Durante la fase 434 de enfriamiento, se graban mediciones para el desplazamiento del sustrato 402 y la temperatura del revestimiento 422 y el sustrato 402.

30 La figura 10D es un gráfico que representa la curvatura del sustrato 438 y la disminución de la temperatura 436 de revestimiento durante la fase 434 de enfriamiento. Debido a la disparidad en el CTE 424 de revestimiento en relación con el CTE 404 de sustrato, el enfriamiento del revestimiento 422 y el sustrato 402 puede dar como resultado una inversión de la curvatura del sustrato 438. A este respecto, la figura 10D puede representar el revestimiento 422 presentando una tensión residual de compresión a temperatura ambiente.

35 Al usar las mediciones de curvatura del sustrato 438 y la temperatura 436 de revestimiento tal como se miden por el dispositivo 400 de medición de curvatura, el procedimiento de determinación de la tensión residual en un revestimiento 422 puede incluir determinar la tensión de deposición en el revestimiento 422 tras la deposición sobre el sustrato 438. La tensión de deposición puede producirse debido a la solidificación y granallado del revestimiento 422 durante deposición. El procedimiento puede incluir además determinar la tensión térmica en el revestimiento 422 durante el enfriamiento del revestimiento 422 basándose en la diferencia entre el CTE 424 de revestimiento y el CTE 404 de sustrato. La tensión térmica en el revestimiento 422 puede calcularse basándose en cambios en la curvatura del sustrato 438 con el cambio en temperatura tal como se da a conocer en la patente estadounidense n.º 6.478.875 dada a conocer anteriormente. El procedimiento puede incluir determinar el módulo elástico del revestimiento 422 basándose en la tensión térmica. El procedimiento puede incluir adicionalmente calcular la tensión residual en el revestimiento 422 basándose en la tensión de deposición y la tensión térmica. De esta manera, el procedimiento proporciona medios para calcular la magnitud y la dirección (compresiva o de tracción) de la tensión residual en el revestimiento 422.

40 Basándose en la tensión residual del revestimiento tal como puede determinarse usando el dispositivo 400 de medición de curvatura ilustrado en las figuras 9A-9D y el procedimiento dado a conocer en la patente estadounidense n.º 6.478.875, pueden ajustarse de manera repetida parámetros de pulverización térmica para aplicar la primera pulverización 206 térmica (figura 4) y la segunda pulverización 236 térmica (figura 5) hasta que una tensión 250 residual neta deseada se logra en el revestimiento 256 de superficie final (figura 6). Tal como se indicó anteriormente, la tensión 250 residual neta es el resultado de la tensión 216 residual en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta y la tensión 242 residual en la porción 238 de revestimiento de lado de parte. A este respecto, el método de aplicar la primera pulverización 206 térmica sobre la superficie 302 de herramienta puede comprender la deposición de la primera pulverización 206 térmica basándose en la temperatura 306 de herramienta, el CTE 308 de herramienta, la temperatura 436 de revestimiento (por ejemplo, la temperatura 210 de pulverización), y el CTE 252 de revestimiento de manera que la diferencia en el CTE 252 de revestimiento y el CTE 308 de herramienta provoca un esfuerzo en la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta que permite la adhesión liberable (por ejemplo, una unión no

permanente) y retirada de la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta de la superficie 302 de herramienta sin dañar el artículo 150 compuesto curado (por ejemplo, sin delaminación, pelado, etc., del artículo 150 compuesto).

Haciendo referencia a la figura 6, en una realización, la porción 212 de revestimiento de lado de herramienta puede tener un CTE 252 de revestimiento que puede ser sustancialmente equivalente al CTE 308 de herramienta para minimizar la diferencia entre la tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie y la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta entre el revestimiento 256 de superficie y la superficie 302 de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta. La resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta puede determinarse por cualquiera de una variedad de métodos diferentes. Por ejemplo, puede implementarse una prueba de tensión en la que puede aplicarse una carga de tracción normal con respecto al plano de un revestimiento que puede unirse entre un par de elementos fijos de prueba (no mostrados). Alternativamente, la magnitud de la resistencia 224 de adhesión de revestimiento de herramienta en la superficie 228 de contacto de revestimiento de herramienta puede determinarse mediante una prueba de indentación o mediante otros métodos.

En la figura 6, el material de revestimiento y el material de herramienta pueden seleccionarse para minimizar la disparidad de CTE. En una realización, el CTE 252 de revestimiento y el CTE 308 de herramienta pueden minimizarse para lograr tensión residual de una dirección deseada. Por ejemplo, al minimizar la disparidad de CTE y aplicar la pulverización térmica a una velocidad relativamente alta y a una temperatura relativamente baja, la tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie puede ser predominantemente compresiva debido al granallado de las partículas 208 de pulverización sobre la superficie 302 de herramienta que otras partículas 208 de pulverización que continúa emitiendo el dispositivo 200 de pulverización. Alternativamente, una disparidad de CTE relativamente más alta en combinación con la aplicación de la pulverización térmica a una velocidad relativamente baja y a una temperatura relativamente alta puede dar como resultado que la tensión 250 residual neta en el revestimiento 256 de superficie sea predominantemente de tracción. Tal como puede observarse, la dirección (por ejemplo, de compresión o de tracción) de la tensión 250 residual neta puede lograrse ajustando el procedimiento de pulverización térmica y los parámetros de material.

Tal como se indicó anteriormente, el revestimiento 256 de superficie puede formarse como un revestimiento metálico sobre un artículo 150 compuesto. El revestimiento metálico puede comprender cualquiera de una variedad de metales diferentes que incluyen, pero no se limitan a, inconel, volframio, molibdeno, aluminio, y cualquiera de una variedad de materiales metálicos adicionales, sin limitación. Del mismo modo, el revestimiento 256 de superficie puede formarse como un revestimiento 256 cerámico de superficie tal como usando un dispositivo de pulverización de plasma (no mostrado) para aplicar la primera pulverización 206 térmica y/o la segunda pulverización 236 térmica. A este respecto, el revestimiento 256 de superficie puede formarse como una mezcla o híbrido de materiales metálicos y cerámicos o cualquiera de una variedad de materiales de revestimiento adicionales.

El método de formación anteriormente descrito de un revestimiento 256 de superficie puede implementarse sobre estructuras 152 compuestas de cualquier tamaño, forma y configuración, sin limitación. En una realización, la estructura 152 compuesta puede comprender cualquier porción de una estructura de aeronave tal como un ala, un dispositivo de punta de ala, aleta de punta de ala, un dispositivo de borde delantero, un dispositivo de mejora de elevación, un listón de borde delantero, una aleta Krueger, un dispositivo de borde trasero, una aleta Fowler, un alerón, una superficie de control, un elevón, una cola en V, una superficie de estabilización, un ventilador, un timón de dirección, una pala de rotor, o cualquiera de una variedad de estructuras compuestas adicionales. En una realización, el revestimiento 256 de superficie puede formarse sobre un borde 118 delantero (figura 2) de una estructura compuesta tal como un ala (figura 1) de una aeronave (figura 1) u otra estructura aerodinámica tal como para la protección frente a erosión y/o protección frente a impacto. En una realización, el revestimiento 256 de superficie puede formarse sobre la porción de cualquier superficie compuesta tal como un ala compuesta para la protección frente a rayos y/o para conducir la electricidad a lo largo de la estructura compuesta. A este respecto, el método dado a conocer en el presente documento puede aplicarse a una estructura compuesta para cualquier aplicación vehicular o para cualquier aplicación no vehicular, sin limitación.

Haciendo referencia a las figuras 12-13, pueden describirse realizaciones de la divulgación en el contexto de un método 600 de mantenimiento y fabricación de aeronave y una aeronave 602 tal como se muestra en la figura 13. Durante la producción previa, el método 600 a modo de ejemplo puede incluir las especificaciones y el diseño 604 de la aeronave 602 y la obtención 606 de material. Durante la producción, tiene lugar la fabricación 608 de subconjuntos y componentes y la integración 610 del sistema de la aeronave 602. A continuación, la aeronave 602 puede experimentar certificación y entrega 612 con el fin de declararse en servicio 614. Cuando se encuentra en servicio por un cliente, la aeronave 602 se programa para servicios 616 de mantenimiento rutinarios (que también pueden incluir modificación, reconfiguración, restauración, y así sucesivamente).

Cada uno de los procedimientos del método 600 puede realizarse o llevarse a cabo por un integrador de sistema, un tercero, y/o un operario (por ejemplo, un cliente). Con los fines de esta descripción, un integrador de sistema puede incluir sin limitación cualquier número de fabricantes de aeronave y subcontratistas mayoritarios; un tercero puede incluir sin limitación cualquier número de vendedores, subcontratistas, y proveedores; y un operario puede ser una aerolínea, sociedad de arrendamiento, organismo militar, clubes de servicio, y así sucesivamente.

- 5 Tal como se muestra en la figura 13, la aeronave 602 producida por el método 600 a modo de ejemplo puede incluir un fuselaje 618 con una pluralidad de sistemas 620 y un interior 622. Ejemplos de sistemas 620 de alto nivel incluyen uno o más de un sistema 624 de propulsión, un sistema 626 eléctrico, un sistema 628 hidráulico, y un sistema 630 ambiental. Puede estar incluido cualquier número de sistemas adicionales. Aunque se muestra un ejemplo aeroespacial, los principios de la invención pueden aplicarse a otros sectores, tales como el sector de la automoción.
- 10 El aparato y los métodos realizados en el presente documento pueden emplearse durante cualesquiera o más de las fases del método 600 de mantenimiento y producción. Por ejemplo, componentes o subconjuntos correspondientes al procedimiento 608 de producción pueden fabricarse o realizarse de manera similar a componentes o subconjuntos producidos mientras la aeronave 602 está en servicio. También, una o más realizaciones de aparato, realizaciones de método, o una combinación de las mismas puede usarse durante las fases 608 y 610 de producción, por ejemplo, acelerando sustancialmente el ensamblado de o reduciendo el coste de una aeronave 602. De manera similar, una o más de realizaciones del aparato, realizaciones de método, o una combinación de las mismas pueden usarse cuando la aeronave 602 está en servicio, por ejemplo y sin limitación, servicios 616 de mantenimiento.
- 15 Modificaciones y mejoras adicionales de la presente divulgación pueden ser evidentes para los expertos habituales en la técnica. Por tanto, la combinación particular de partes descritas e ilustradas en el presente documento está destinada a representar solamente determinadas realizaciones de la presente divulgación y no está destinada a limitar realizaciones o dispositivos alternativos dentro del alcance de la divulgación.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de formación de un revestimiento (256) de superficie sobre un artículo (150) compuesto, que comprende las etapas de:
- 5 aplicar una pulverización (206, 236) térmica a una superficie (302) de herramienta de una herramienta (300) de una manera tal como para formar un revestimiento (256) de superficie que tiene una unión (226) liberable con la superficie (302) de herramienta, comprendiendo la etapa de aplicar la pulverización (206, 236) térmica:
- 10 aplicar una primera pulverización (206) térmica usando un dispositivo (202) de oxicomcombustible a alta velocidad para formar una porción (212) de revestimiento de lado de herramienta del revestimiento (256) de superficie, teniendo la porción (212) de revestimiento de lado de herramienta una unión (226) liberable con la superficie (302) de herramienta; y
- 15 aplicar una segunda pulverización (236) térmica usando un dispositivo de arco de alambre doble para formar una porción (238) de revestimiento de lado de parte del revestimiento (256) de superficie, aplicándose el material (156) compuesto sobre la porción (238) de revestimiento de lado de parte de manera que el revestimiento (256) de superficie se forma con una tensión (250) residual neta que es sustancialmente equivalente en magnitud a una resistencia (224) de adhesión de revestimiento de herramienta:
- aplicar material (156) compuesto sobre el revestimiento (256) de superficie;
- curar el material (156) compuesto para formar un artículo (150) compuesto curado; y
- 20 retirar el artículo (150) compuesto curado de la herramienta (300) de manera que libera el revestimiento (256) de superficie de la superficie (302) de herramienta y retiene el revestimiento (256) de superficie con el artículo (150) compuesto curado.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la tensión (250) residual neta del revestimiento (256) de superficie es el resultado de una tensión (216) residual de la porción (212) de revestimiento de lado de herramienta y la porción (238) de revestimiento de lado de parte, y en el que las etapas de aplicar la primera pulverización (206) térmica y la segunda pulverización (236) térmica comprenden:
- 25 ajustar al menos un parámetro de procedimiento de tal manera que la tensión (216) residual en la porción (212) de revestimiento de lado de herramienta contrarreste la tensión (242) residual en la porción (238) de revestimiento de lado de parte por una cantidad que provoca que la tensión (250) residual neta sea sustancialmente equivalente a la resistencia (224) de adhesión de revestimiento de herramienta, comprendiendo la etapa de ajustar al menos un parámetro de procedimiento:
- 30 determinar la tensión residual (216, 242) en al menos una de la porción (212) de revestimiento de lado de herramienta y la porción (238) de revestimiento de lado de parte realizando lo siguiente:
- pulverizar el revestimiento (422) sobre un sustrato (402);
- medir un cambio de la curvatura del sustrato (402) en respuesta a la pulverización del revestimiento (422) sobre el sustrato (402);
- 35 determinar una tensión de deposición en el revestimiento (422) tras la deposición sobre el sustrato (402);
- determinar una tensión térmica en el revestimiento (422) durante el enfriamiento del revestimiento (422) basándose en una diferencia entre un coeficiente de expansión térmica (CTE) (424) de revestimiento y un CTE (404) de sustrato;
- calcular la tensión (430) residual en el revestimiento (422) basándose en la tensión de deposición y la tensión térmica; y
- 40 ajustar de manera repetida el al menos un parámetro de procedimiento y calcular la tensión (430) residual hasta que la tensión (250) residual neta es sustancialmente equivalente a la resistencia (224) de adhesión de revestimiento de herramienta.
3. Método según la reivindicación 2, en el que la etapa de ajustar al menos un parámetro de procedimiento comprende ajustar al menos uno de:
- 45 un parámetro de pulverización y una característica de herramienta.
4. Método según la reivindicación 3, en el que el parámetro de pulverización comprende al menos uno de un parámetro de penacho y una característica de materia prima.
5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de aplicar la pulverización (206, 236) térmica comprende:

realizar la deposición del revestimiento (256) de superficie a una temperatura de revestimiento que promueve la adhesión a la superficie (302) de herramienta de tal manera que el revestimiento (256) de superficie permanece adherido a la superficie (302) de herramienta durante la acumulación del material (156) compuesto y se libera de la superficie (302) de herramienta durante la retirada del artículo (150) compuesto curado de la herramienta (300).

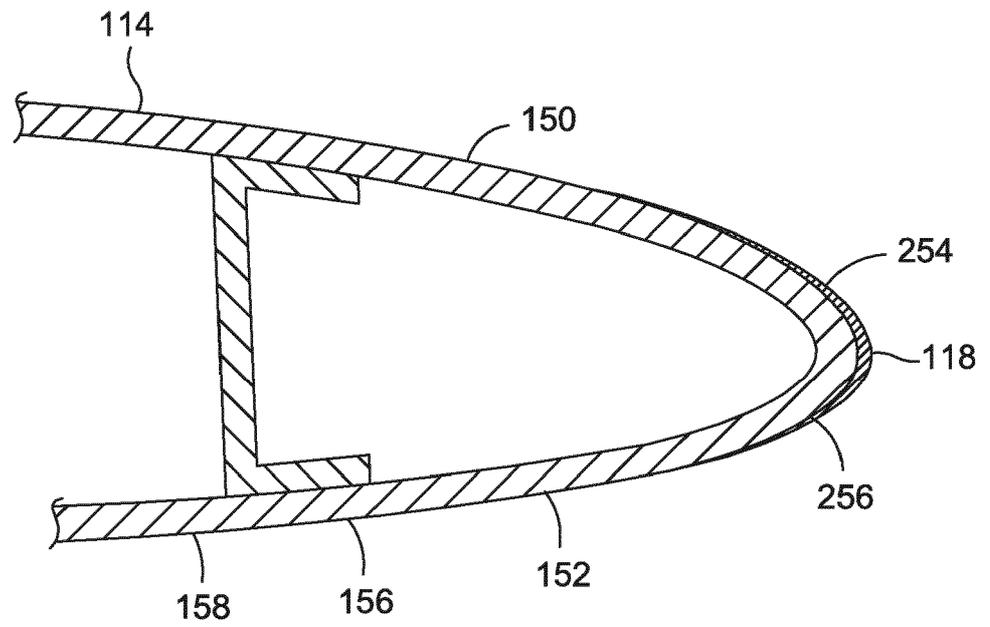
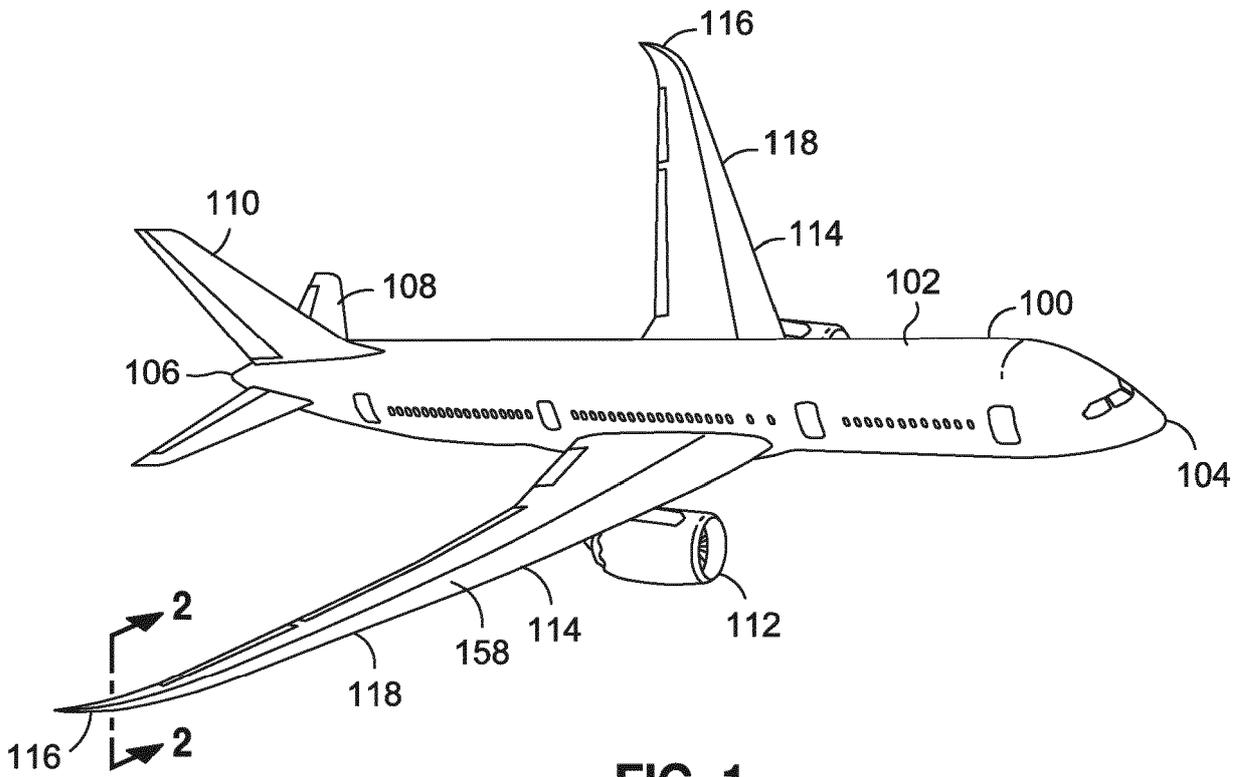
5 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de aplicar la pulverización (206, 236) térmica incluye:

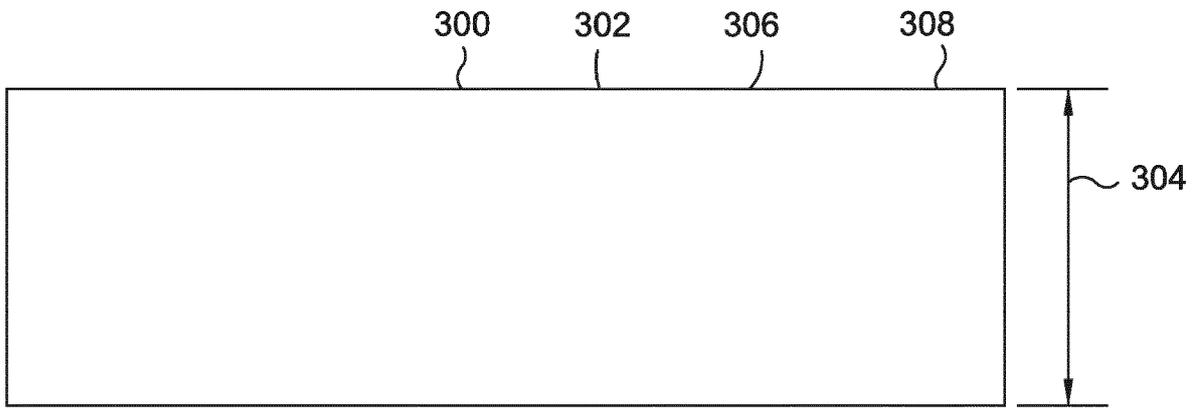
que al menos una de la porción (212) de revestimiento de lado de herramienta y la porción (238) de revestimiento de lado de parte tenga un grosor (214, 240) de entre aproximadamente 0,0127 y 2,54 mm (0,0005 y 0,10 pulgadas).

10 7. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el revestimiento (256) de superficie comprende un revestimiento (256) de superficie metálico.

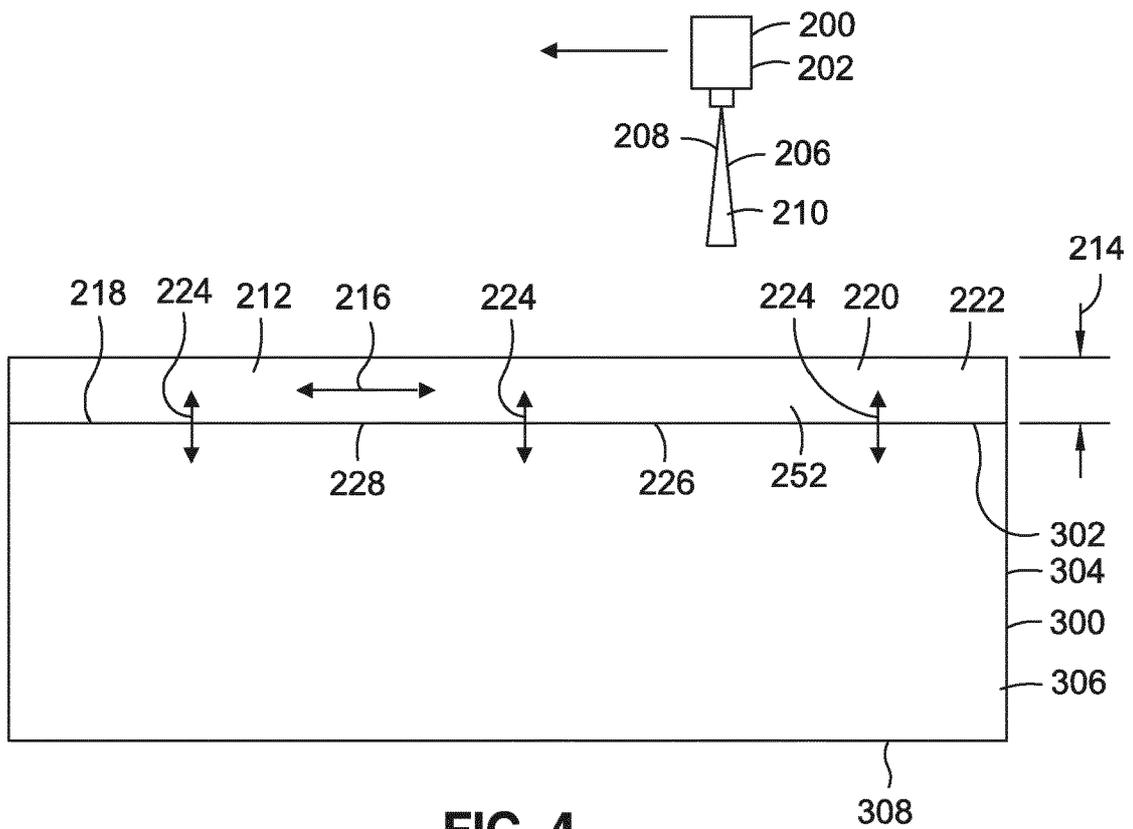
8. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el revestimiento (256) de superficie comprende un revestimiento (256) de superficie cerámico.

9. Estructura (152) compuesta formada por el método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.





**FIG. 3**



**FIG. 4**

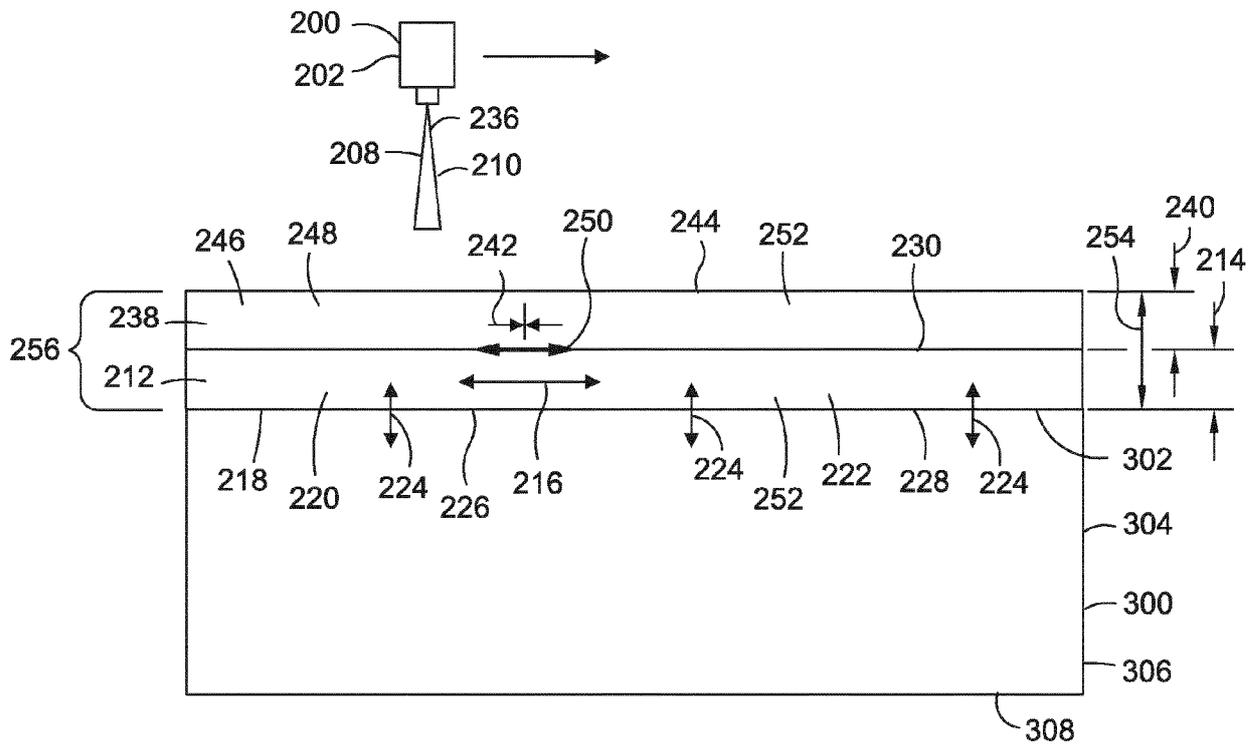


FIG. 5

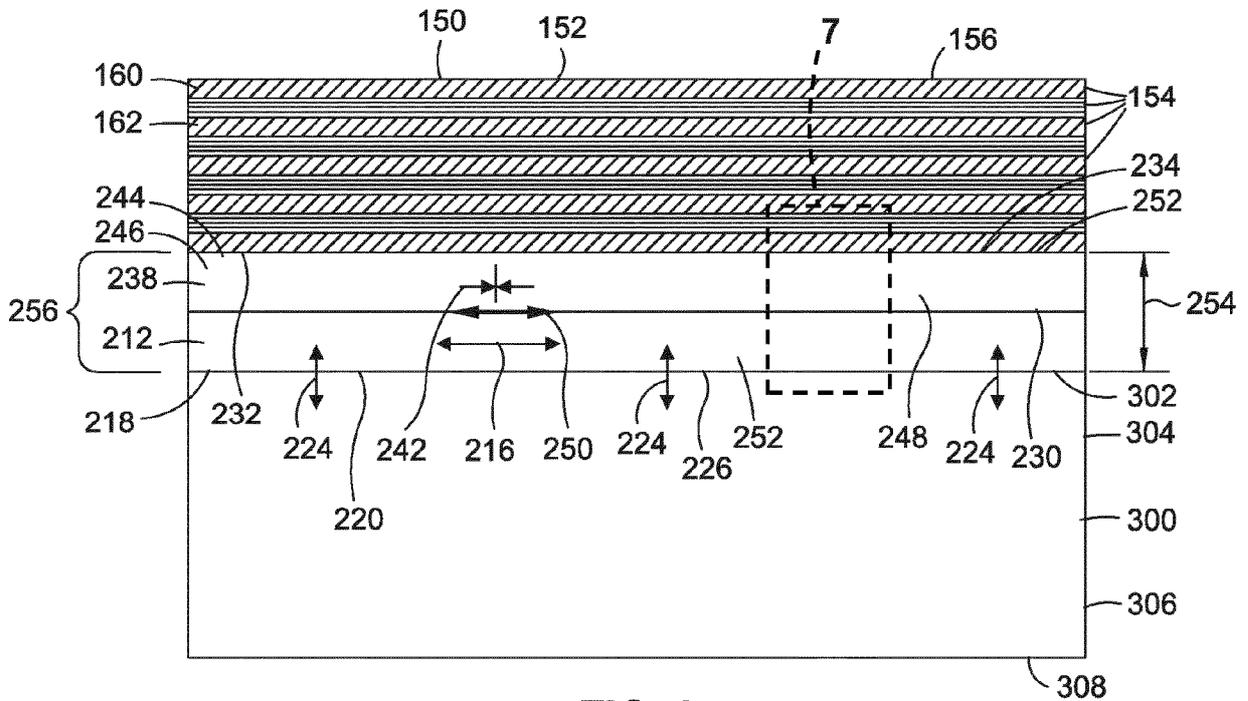
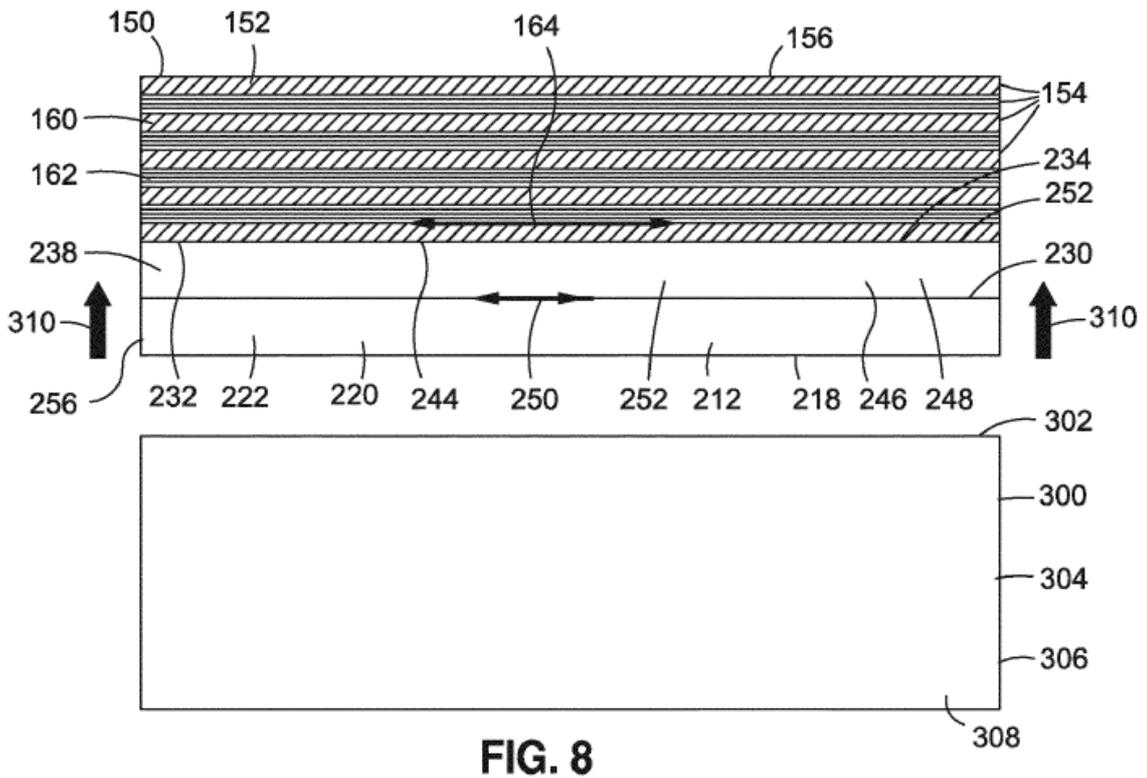
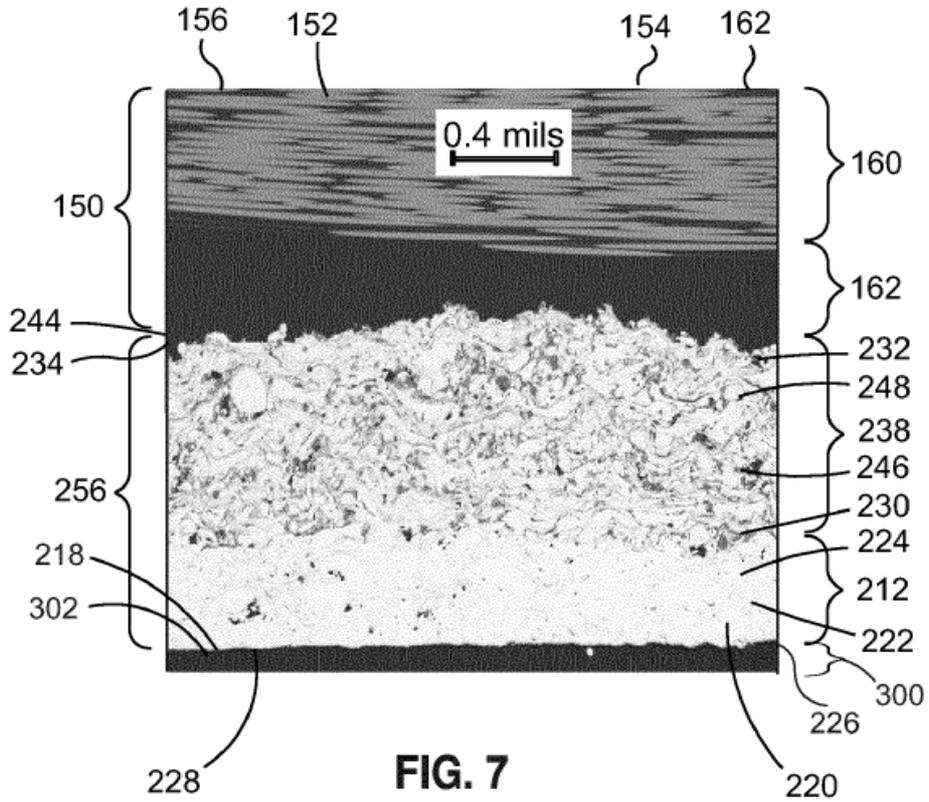


FIG. 6



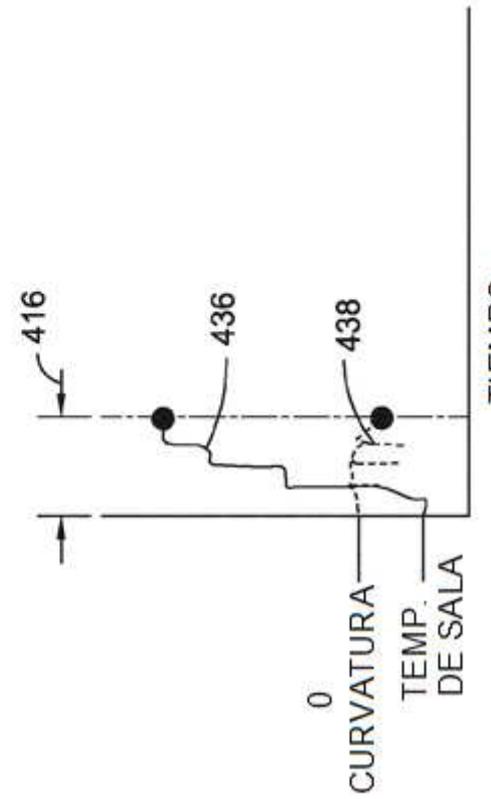
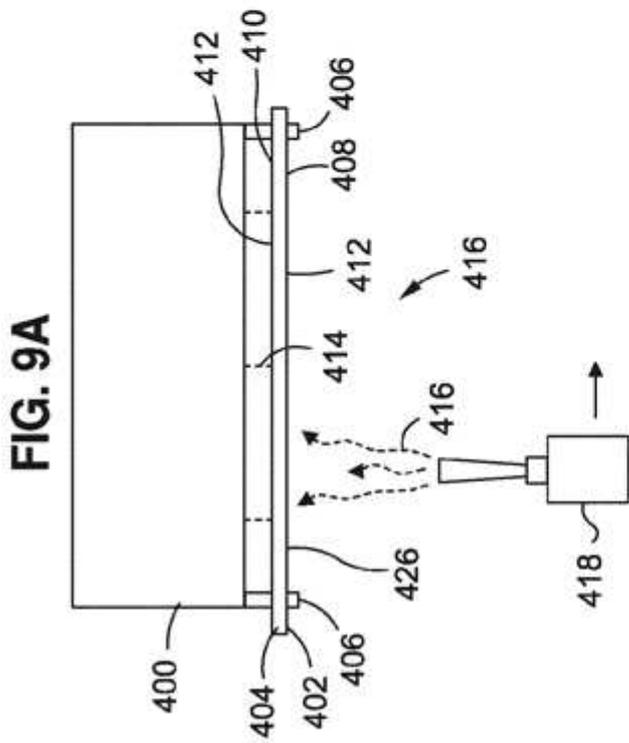
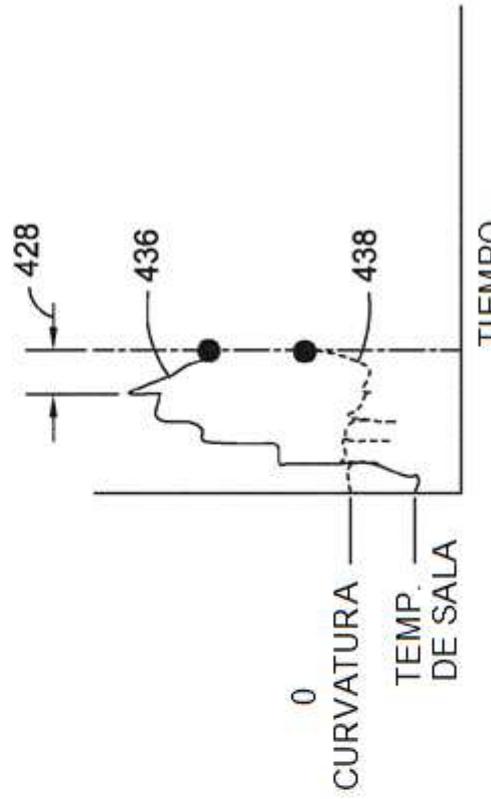
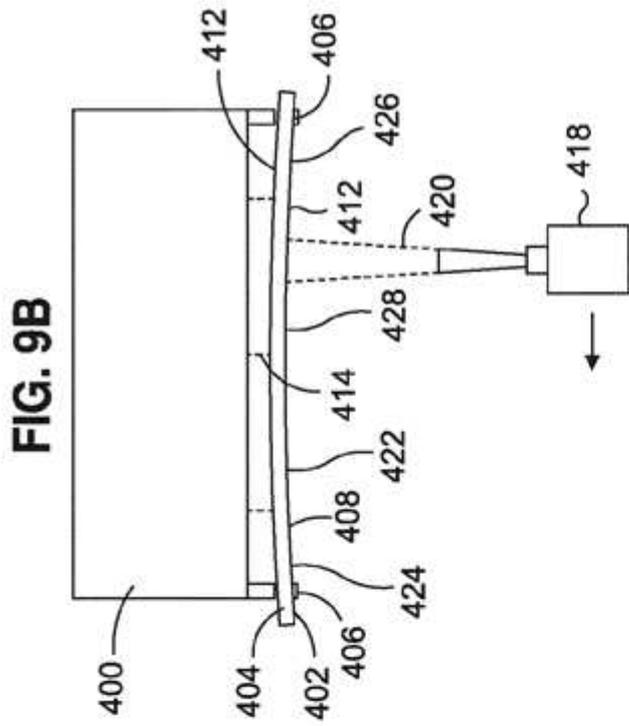


FIG. 9D

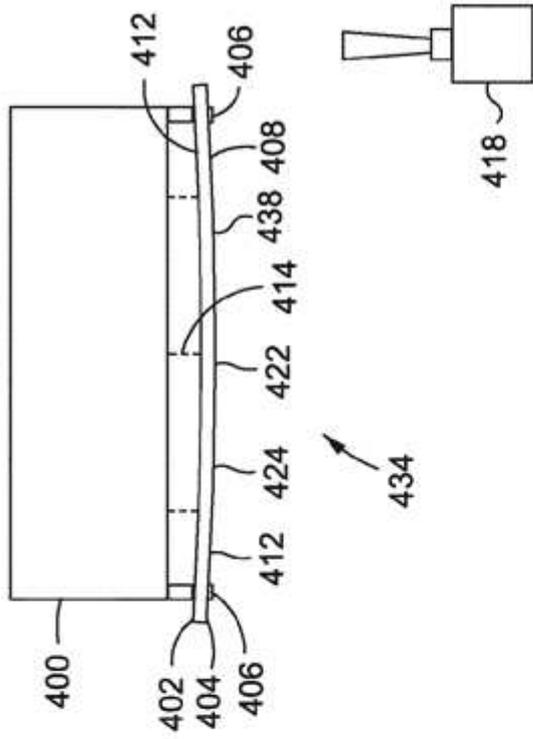


FIG. 9C

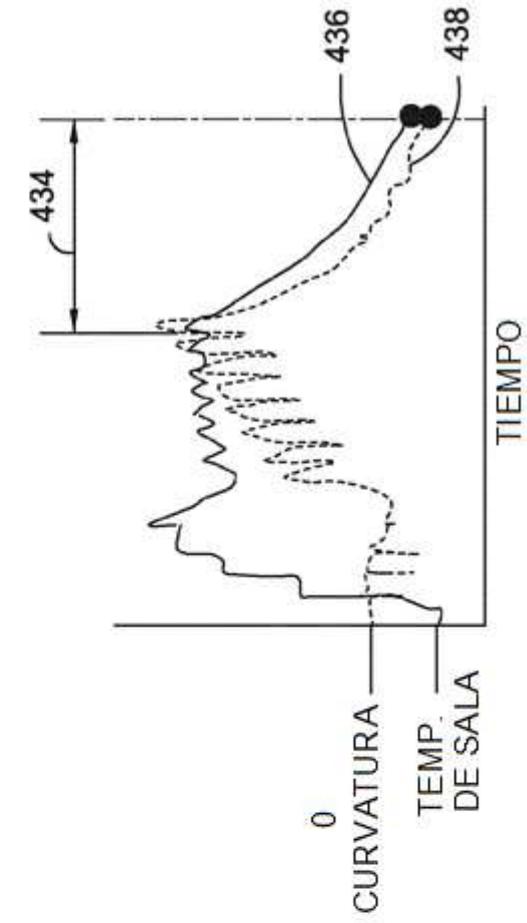
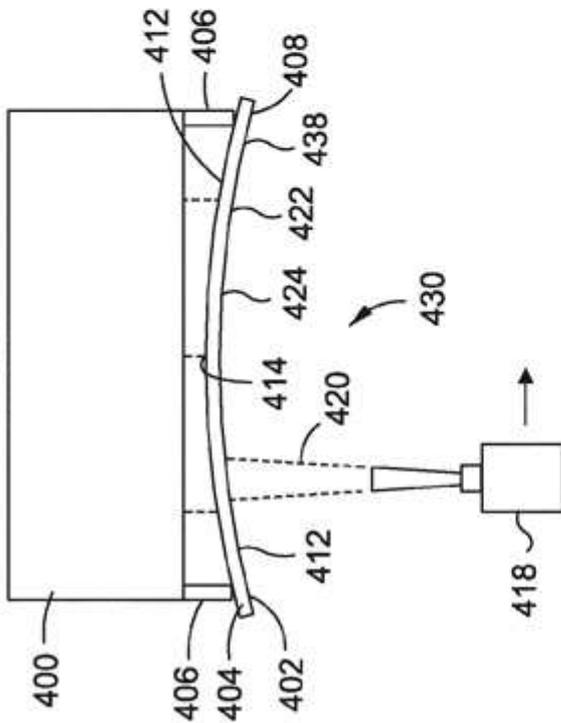


FIG. 10D

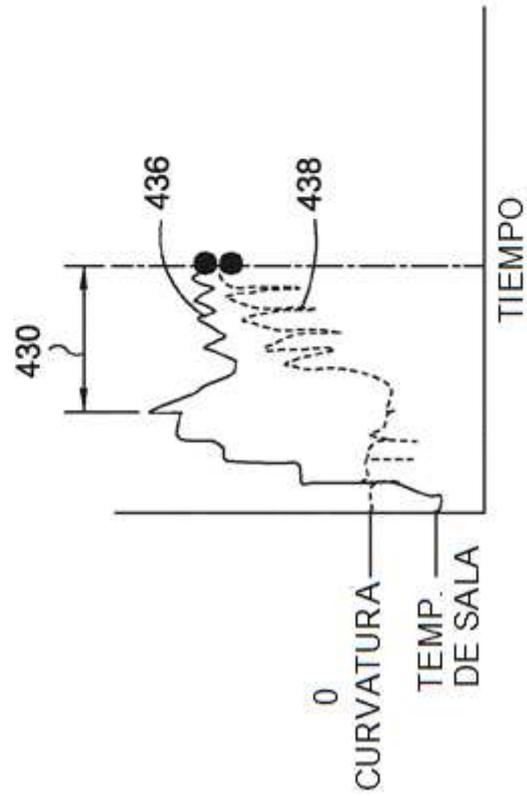


FIG. 10C

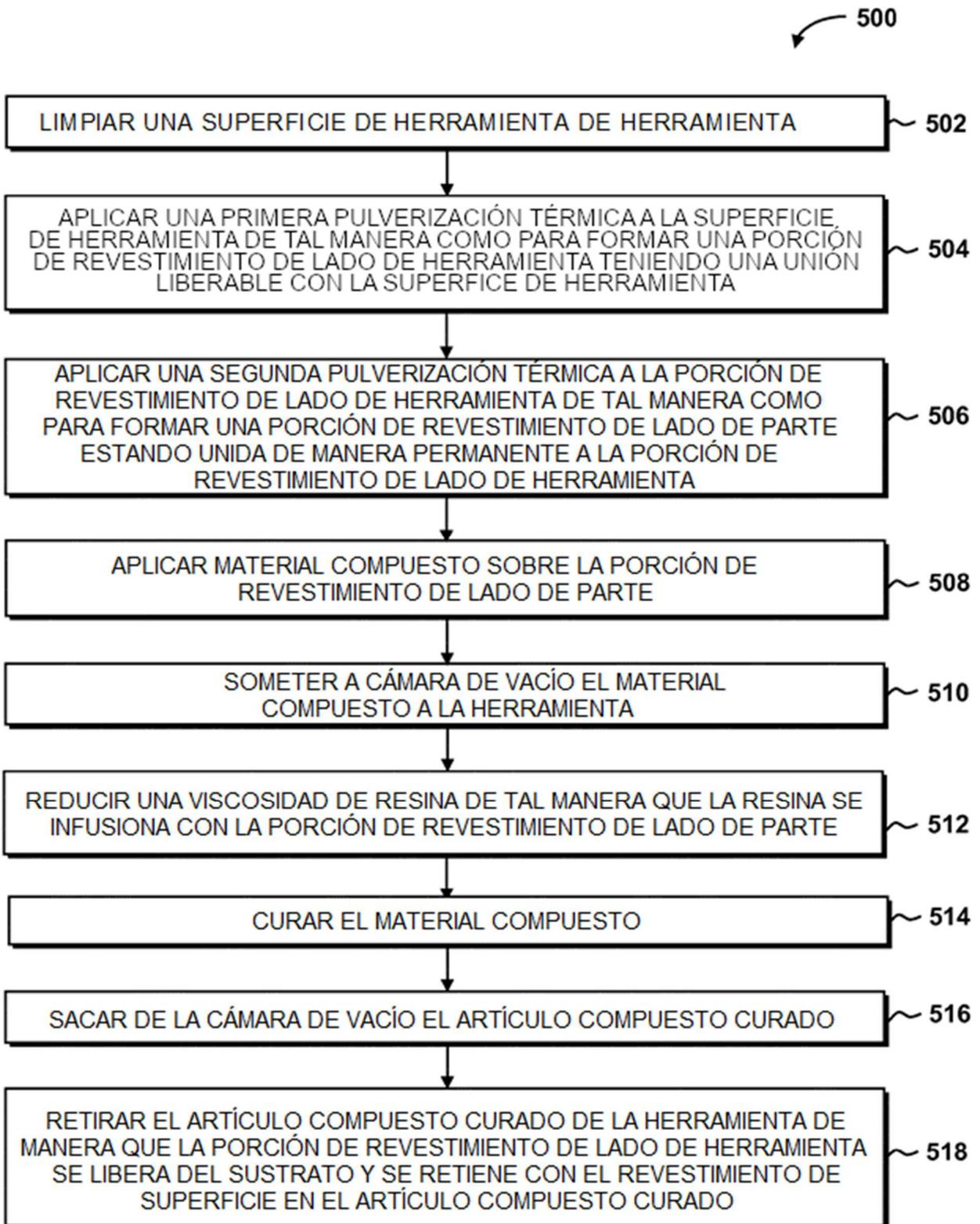


FIG. 11

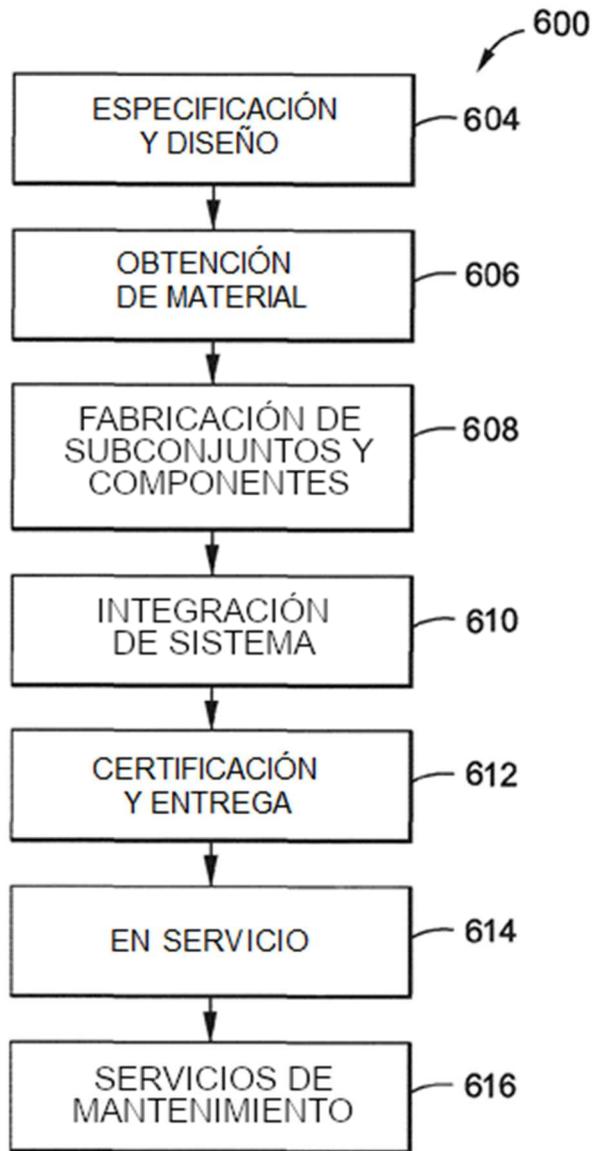


FIG. 12

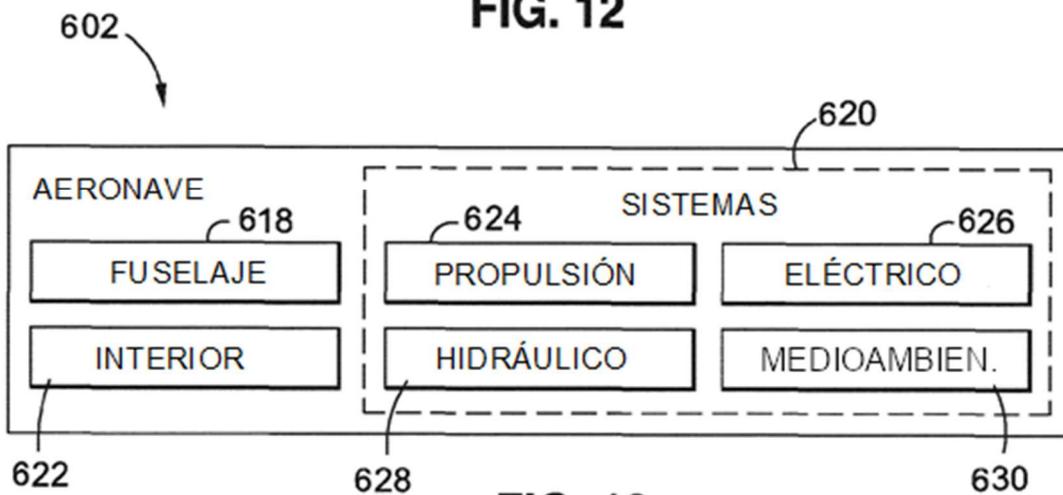


FIG. 13