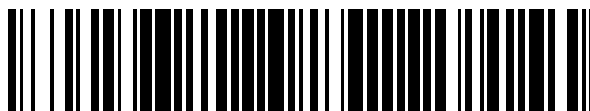


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 390 067**

51 Int. Cl.:
B29C 70/54 (2006.01)
B29C 65/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **01953577 .2**
96 Fecha de presentación: **19.07.2001**
97 Número de publicación de la solicitud: **1337400**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **27.08.2003**

54 Título: **Método ultrasónico de fabricación de una estructura de material compuesto reforzado con fibras, de matriz termoendurecible**

30 Prioridad:
19.10.2000 US 691970

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
06.11.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
06.11.2012

73 Titular/es:
ALLIANT TECHSYSTEMS INC. (100.0%)
7480 Flying Cloud Drive
Minneapolis, MN 55344-3720 , US

72 Inventor/es:
LEEMON, VICTOR;
BULLOCK, DANIEL, E.;
ROYLANCE, MARGARET, E.;
WOODS, JACK, A.;
BOYCE, JOSEPH, S. y
PLAYER, JOHN, C.

74 Agente/Representante:
DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 390 067 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

Método ultrasónico de fabricación de una estructura de material compuesto reforzado con fibras, de matriz termoendurecible

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere a un método mejorado para consolidar ultrasónicamente estratos o capas de materiales compuestos reforzados con fibras, de matriz de resina termoendurecible, y más particularmente a un método tal que aplica energía ultrasónica, generalmente en paralelo a la superficie del estrato, para producir un cizallamiento sustancial en las capas, para efectuar el calentamiento de la matriz de resina. La invención también se refiere al producto fabricado mediante ese método.

10 **Antecedentes de la invención**

Los materiales compuestos se han vuelto cada vez más atractivos para una amplia variedad de usos, desde aviones y automóviles, hasta artículos deportivos y juguetes, debido a su alta rigidez y relación resistencia-peso. Un tipo de material compuesto incluye una combinación de fibras, o haces fibrosos, en una matriz de resina termoendurecible. Típicamente, una estructura de material compuesto tal se fabrica con varios estratos o capas de una cinta "prepreg" (preimpregnada). Según se usa aquí, por material compuesto se indica una estructura compuesta de una pluralidad de capas de un tejido o una cinta reforzados con fibras, en una matriz de resina termoendurecible. A menudo, el tejido seco con fibras unidireccionales o haces de fibras o fibras tejidas, se combina previamente con una resina termoendurecible, como un "prepreg". Los ejemplos incluyen las fibras de carbono, de vidrio o de grafito en una matriz de resina termoendurecible progresivamente. Típicamente, las fibras comprenden más de 35% en volumen del material. Generalmente, los materiales compuestos termoendurecibles requieren que las capas de fibra/resina sean apiladas (del inglés, "lay-up"), apelmazadas y luego curadas.

Este procedimiento puede precisar varias horas. Tales materiales compuestos se han de comparar con los materiales compuestos termoplásticos, que en general se fabrican más rápidamente debido a que no implican curado alguno. Las capas termoplásticas solo se necesitan calentar para que se funda la matriz plástica, y luego comprimir conjuntamente o consolidar con las otras capas, antes de enfriar. Por otra parte, con los materiales compuestos termoendurecibles, el calentamiento a una temperatura suficientemente alta origina una reacción exotérmica que provoca que las moléculas de resina se reticulen. Una vez que esta reticulación química se produce, la viscosidad de la resina no se puede disminuir. Esto no sucede con las resinas del tipo termoplástico.

Según se usa aquí, por consolidación se indica la estratificación de dos o más capas entre sí para formar una pieza o una estructura. Una buena consolidación implica un bajo nivel de huecos (típicamente menos de 3%) y una resistencia al cizallamiento de las superficies de contacto de las capas después del curado que se aproxima a la de la matriz de resina.

El bobinado de filamentos, la colocación de cintas y la colocación de haces de filamentos son métodos comunes para fabricar piezas a partir de materiales compuestos reforzados con fibras.

35 El bobinado de filamentos implica el bobinado alrededor de un mandril de un haz de filamentos, conocido en inglés como "tow", al que previamente se ha aplicado una resina. Para lograr el espesor de pieza requerido se dan múltiples vueltas alrededor del mandril, después de lo cual la pieza se cura en una estufa o un autoclave.

Durante el bobinado, las piezas más gruesas pueden requerir unas etapas intermedias de consolidación o compactación, conocidas como "apelmazamiento" (en inglés, "debulk"), que usan calor conjuntamente con presión y/o vacío. Las piezas delgadas curadas sin ningún apelmazamiento intermedio a menudo manifiestan un cierto arrugamiento de las fibras, lo que degrada las propiedades mecánicas de la pieza curada.

40 En la colocación de cintas o de haces de filamentos se usa un cabezal robótico para colocar unos haces de filamentos o cintas "prepreg" estrechos (típicamente de una anchura de 3,175-50,8 mm (0,125-2 inches)) contra una herramienta que delimita la forma deseada de la pieza. Se colocan múltiples estratos con diferentes orientaciones para obtener la construcción de capas y el espesor de piezas requeridos. Se requiere la combinación de una presión negativa sobre el haz de filamentos, aplicada mediante el cabezal, y cierta pegajosidad (encolado del haz de filamentos) para asegurar que el haz de filamentos permanezca en su posición después de su colocación, particularmente cuando el haz de filamentos se coloca sobre las partes cóncavas de la herramienta.

50 Normalmente se calienta el haz de filamentos, y los estratos de capas depositadas previamente, para aumentar la pegajosidad antes de la colocación mediante el cabezal robótico.

Las máquinas corrientes de colocación de haces de filamentos usan mecanismos independientes, colocados en la proximidad inmediata, para aplicar calor y presión. Corrientemente, el calor se aplica mediante una inyección de gas caliente dirigida sobre el haz de filamentos y la presión se aplica mediante uno o más rodillos o zapatas que se deslizan por la superficie del haz de filamentos. Los niveles de consolidación conseguidos de esta manera son tales

que las piezas gruesas colocadas con haces de filamentos o con cintas también requieren un apelmazamiento intermedio para evitar el movimiento o el arrugamiento de las fibras durante el curado.

Un obstáculo para conseguir coherentemente unos niveles de consolidación más altos con estos procedimientos es la dificultad inherente al control de la temperatura. Debido a la capacidad térmica presente en un sistema de gas caliente, la temperatura de la inyección de gas, y por consiguiente el aporte de calor al haz de filamentos, no se puede modular fácilmente para tomar en consideración los arranques, las paradas o los cambios en la velocidad de avance del cabezal robótico.

Típicamente, el apelmazamiento intermedio implica aplicar a la herramienta o mandril de apilado una bolsa de vacío, junto con los asociados compuestos obturadores para bolsas, tuberías de vacío, conexiones, etc., y el traslado de la herramienta desde la máquina de colocación del haz de filamentos a una estufa o un autoclave donde se calienta a 82,2-121,1°C (180-250°F) y se mantiene bajo una presión de vacío durante como mucho cuatro horas. Luego, la pieza se devuelve a la máquina de colocación de cintas para continuar el procedimiento de apilado. Las piezas gruesas comunes, tales como el vástago V-22 y el eje giratorio F-22, requieren numerosos apelmazamientos intermedios, lo que supone añadir un coste sustancial.

Se desea, y puede dar lugar a sustanciales ahorros de coste, un método de aplicación de calor y presión que consiga unos altos niveles de consolidación durante la colocación de cintas o haces de filamentos, eliminando de este modo la necesidad de apelmazamientos intermedios. La presente invención se refiere a un método tal que usa una bocina ultrasónica para generar el calor y la presión requeridos para la consolidación. Además, en algunos casos, el método tiene el potencial de reemplazar el curado en un autoclave por un curado en una estufa.

Por varias razones se ha recurrido al uso de dispositivos ultrasónicos para calentar las capas. A diferencia de la convección (gas caliente), conducción (zapatas/fundiciones calientes) o radiación (infrarroja), la consolidación ultrasónica no depende de una fuerza motriz térmica para efectuar la transferencia de energía al material compuesto. El calentamiento ultrasónico es modulable instantáneamente y proporciona un calentamiento profundo y penetrante de la matriz polímera, más allá de un calentamiento meramente superficial.

Desde hace mucho tiempo, la soldadura ultrasónica se ha usado para soldar o unir plásticos puros (no reforzados) sin fibras o con un bajo contenido de fibras. Una soldadura tal se realiza mediante colocar una bocina ultrasónica perpendicular a dos estratos de plástico, prensar los estratos y energizar la bocina. La patente de EE.UU. N° 4.713.131, a Obeda, enseña cómo unir grandes láminas de plástico de polipropileno mediante solapar las láminas de plástico y soldar sus bordes entre sí usando una bocina ultrasónica colocada entre las láminas. Sin embargo, Obeda no enseña nada sobre materiales compuestos. La patente de EE.UU. N° 5.789.061, a Campbell et al., enseña un conjunto rigidizador reforzado en el que por medio del rigidizador se insertan unos vástagos de refuerzo en la región del radio del rigidizador y en el interior del material superficial, en un ejemplo, usando una bocina ultrasónica que se hace funcionar sobre la combinación del cuerpo esponjoso/vástago para comunicar energía ultrasónica a los vástagos. La patente DE-1957216 enseña un método para encolar materiales textiles dispuestos en una banda por medio de ultrasonidos.

Pero, otros han intentado usar una bocina ultrasónica para fabricar piezas de material compuesto. Véase *Joining Methods for Plastic and Plastic Composites: An Overview*, Vijay Stokes, *Polymer Engineering and Science*, mediados de Octubre de 1989, vol. 29, núm. 19, págs. 1.310-1.324, específicamente las págs. 1.322-1.324, artículos 168-236. Estos intentos previos para soldar materiales compuestos termoplásticos uniformes durante el procedimiento de estratificación, usando técnicas convencionales de soldadura con una bocina ultrasónica dispuesta perpendicularmente, han proporcionado resultados decepcionantes, debido según se cree a que la presencia de las fibras altera la transferencia de energía en el material. Por otra parte, estas técnicas convencionales de soldadura ultrasónica originan en el material un frente de onda de compresión que no se transmite bien a través del mismo. En 1987, los ingenieros de Martin Marietta intentaron usar una bocina ultrasónica para consolidar capas de fibra-resina termoplástica de material compuesto. La bocina se colocó encima de dos capas móviles a ser consolidadas, en una dirección perpendicular a las capas. Se ensayó un intervalo de diferentes presiones, niveles de energía y caudales de alimentación. Sin embargo, el resultado no fue satisfactorio: "Los resultados de la exploración C han mostrado que los intentos para producir materiales estratificados consolidados o casi consolidados no han sido fructíferos hasta ahora..." *Sonic Assisted Process Development*, Interim Technical Report, contrato N° F33615-86-5041, a Martin Marietta Baltimore para los laboratorios de Material Laboratory Air Force Wright, Marzo 1987.

Por lo tanto, aunque se han usado bocinas ultrasónicas para soldar láminas de plástico entre sí y, hasta cierto punto, han tenido éxito para soldar termoplásticos que contienen hasta alrededor de 35% de material de carga (tales como vidrio o talco), el estado de la técnica revela que no hay una metodología exitosa para fabricar estructuras de material compuesto de fibras y matriz de resina termoendurecible o termoplástica en la que se usa una bocina ultrasónica para consolidar y apelmazar las capas individuales de fibra-resina.

Compendio de la invención

Por lo tanto, es un objeto de esta invención proporcionar un método de fabricación de una estructura de material compuesto de fibras y matriz de resina termoendurecible.

Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que utiliza una bocina ultrasónica para consolidar las capas de fibra-resina de la estructura de material compuesto.

Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que sea controlable y modulable instantáneamente, y que no requiera un diferencial térmico grande entre el dispositivo y el material.

- 5 Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que sea mucho menos propenso a provocar sobrecalentamientos o daños al material, o de desvirtuar la calidad de la consolidación.

Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que calienta y aplica presión simultáneamente.

- 10 Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que sea más rápido y fácil de emplear y que sea menos caro, tanto en la ejecución como en el equipo requerido, y que sea sumamente eficaz en consumo energético.

Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que elimine las repetidas operaciones de apelmazamiento requeridas en la técnica anterior y en el que el apelmazamiento se produzca conforme las capas se tienden.

- 15 Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un método tal que no solo pueda apelmazar conforme las capas se tienden, sino que también pueda hacer progresar la reacción química de la resina de modo que se aproxime a una condición comúnmente referida como "punto de gelificación", volviendo de este modo posible el curado final de las piezas en una estufa en lugar de un autoclave.

Es un objeto adicional de esta invención reducir o eliminar las repetidas operaciones de apelmazamiento asociadas con la técnica anterior.

- 20 Es un objeto adicional de esta invención proporcionar un mayor control del procedimiento de apelmazamiento.

Es un objeto adicional de esta invención sacar provecho del "anidamiento" o sedimentación de las fibras que se produce debido a la vibración ultrasónica y que, de este modo, mejora las propiedades interlaminares de capa en capa.

- 25 La invención es consecuencia de la comprensión de que las capas de materiales termoendurecibles reforzados con fibras se pueden apelmazar y curar parcial o incluso completamente mediante la aplicación de energía ultrasónica a la capa de más arriba de la pila de capas, para producir una onda transversal en las capas, con tal que la onda transversal tenga un nivel de energía suficiente para reducir la viscosidad de la resina termoendurecible hasta el punto de que las capas se puedan apelmazar bajo la aplicación de presión, pero que no tenga un nivel de energía demasiado alto para evitar la reticulación química completa de la resina de modo que todavía se pueda reticular químicamente otra capa con la capa de más arriba.

- 30 Esta invención muestra un método de fabricación de una estructura de material compuesto reforzado con fibras, de matriz termoendurecible. El método comprende ensamblar una pila de capas de material termoendurecible reforzado con fibras, acoplar una bocina ultrasónica con la superficie superior de la capa de más arriba, y orientar la bocina en un ángulo agudo con respecto a la superficie superior y energizar la bocina para producir una onda transversal en las capas, para calentar las capas. Típicamente, para consolidar las capas la bocina se mueve a lo largo de la capa de más arriba. El nivel de energía aplicado mediante la bocina es suficiente para reducir la viscosidad de la resina termoendurecible hasta el punto de que las capas se puedan apelmazar, pero no suficientemente alto como para reticular completamente la resina de modo que todavía se pueda reticular completamente otra capa con la capa de más arriba. Para apelmazar las capas, se aplica presión a las capas por medio de la bocina y/o un rodillo o zapata independientes.

Típicamente, las capas de matriz termoendurecible tienen más de 40% en volumen de fibras. El curado final puede tener lugar en una estufa o en un autoclave.

- 35 El método de esta invención se refiere a la fabricación de una estructura de material compuesto de matriz y fibras. En un mandril se ensambla una pila de capas de un material compuesto de matriz de resina termoendurecible reforzado con fibras. Una bocina ultrasónica se acopla con la superficie superior de la capa de más arriba, se orienta en un ángulo agudo con respecto a la superficie y se energiza para producir una onda transversal en las capas, para consolidar y apelmazar las capas.

Breve descripción de los dibujos

- 50 A los expertos en la técnica se les ocurrirán otros objetos, características y ventajas a partir de la siguiente descripción de una realización preferida y los dibujos anexos, en los que:

La Figura 1 es una representación esquemática de un método ultrasónico de estratificación de una pieza de material compuesto de matriz de resina termoendurecible y fibras según esta invención, en donde la fuerza de consolidación se aplica por medio de una bocina ultrasónica; y

la Figura 2 es una vista similar a la Figura 1, en donde la fuerza de consolidación se aplica por medio de una zapata o un rodillo de presión independientes;

la Figura 3 es una gráfica que muestra la relación entre la viscosidad y la temperatura de un material termoplástico;

5 la Figura 4 es una gráfica que muestra la relación entre la viscosidad y la temperatura de un material termoendurecible;

la Figura 5 es una vista esquemática parcial de un componente de rejilla "isogrid" de un material compuesto que se fabricó usando el procedimiento de la invención; y

la Figura 6 es una vista esquemática de una estructura cilíndrica fabricada según la presente invención.

10 Descripción de la realización preferida

En la Figura 1 se muestra una capa 10 (estrato, haz de filamentos, banda o cinta) de material compuesto reforzado con fibras, de matriz de resina termoendurecible, en el procedimiento de aplicación a otras capas 14 y 16 de material compuesto reforzado con fibras, de matriz de resina termoendurecible. Se aplica energía ultrasónica a una bocina modificada 30, que se hace vibrar en la dirección mostrada por la flecha 33 a lo largo de su eje longitudinal 32, mediante un transductor ultrasónico 34 accionado mediante el suministro de corriente 36.

En la técnica anterior, la bocina ultrasónica 30 se colocaba perpendicular a las capas de materiales termoplásticos y se entendía que, en general, las ondas de esfuerzo ultrasónicas resultantes eran ondas de compresión que se movían perpendicularmente a través de las capas.

20 Como se explicó anteriormente en los "Antecedentes de la invención", esta técnica de la técnica anterior, en la que la bocina ultrasónica se coloca perpendicular a las capas, ha tenido poco éxito. Se cree que esto es debido en parte a que las fibras de la capa 10 afectan y disipan la energía antes de que se pueda convertir en calor en la superficie de contacto 40 entre la capa 10 y la capa 14. Una bocina colocada perpendicularmente a las capas no dio lugar a una consolidación exitosa. Véase, por ejemplo, el informe de Martin Marietta citado anteriormente en los "Antecedentes de la invención".

25 Sin embargo, según esta invención, el eje central de la bocina ultrasónica 30 se dispone en un ángulo agudo θ respecto a la superficie 42 de la capa de más arriba 10. Preferiblemente, se usa un ángulo por debajo de 45° y, sorprendentemente, se han obtenido buenos resultados con un ángulo θ de aproximadamente 30° . A diferencia de una bocina orientada perpendicularmente, las vibraciones de la bocina en ángulo se producen longitudinalmente, como se indica mediante la flecha 33, generalmente en paralelo al eje longitudinal de la bocina 30. Pero, en este caso, las ondas transversales de vibraciones producidas en el material, concretamente en las capas 10 y 14, son en general paralelas a la superficie 42 del material estratificado 12, pero también se propagan perpendicularmente a la superficie 42. La vibración de la bocina 30 origina un cizallamiento en las capas 10 y 14 en una dirección en general paralela a la superficie 42, como se indica mediante las flechas 44. Con esta orientación, los ensayos han mostrado que el calentamiento y la consolidación son sustancialmente superiores a la técnica anterior.

35 Es importante que la bocina esté en contacto íntimo con el material compuesto. La fuerza detrás de este contacto es una variable de control en relación con la operación exitosa de un dispositivo ultrasónico. La fuerza se debe aplicar en, o cerca de, una localización señalada a lo largo del dispositivo ultrasónico a fin de no afectar adversamente a las vibraciones ultrasónicas deseadas. El componente del dispositivo ultrasónico al que se aplica corrientemente la fuerza se puede designar especialmente, y por lo común se localiza, sujetado rígidamente, entre la bocina y el transductor. Este componente, convencionalmente referido como potenciador, se monta a su vez de una manera insensible a la fuerza a fin de aislar el dispositivo ultrasónico de cualquier aparato(s) circundante(s). Aunque también se usan otras formas de aplicación de fuerzas de contacto, la fuerza se puede aplicar de la siguiente manera: el dispositivo 50 de aplicación de la fuerza se pone en contacto con el potenciador 52. El dispositivo 50 de aplicación de la fuerza puede ser un muelle, un solenoide accionado eléctricamente o un dispositivo electromecánico accionado por un motor. También se han usado accionadores hidráulicos y neumáticos.

40 Generalmente, las capas 10, 14 y 16 a consolidar y apelmazar se colocan en un mandril 43, como se muestra. Durante la operación, la bocina 30 se puede arrastrar a lo largo, hacia la derecha en la Figura 2, para realizar una consolidación continua tal como se requiere en las operaciones de bobinado de filamentos o tendido de cintas en la fabricación de materiales compuestos termoendurecibles. En una realización, el transductor 34 se operó a 40 kHz, aunque se pueden usar otras frecuencias. La bocina también se puede empujar a través de la superficie superior de la capa de más arriba, o la bocina se puede mantener inmóvil y mover la pila de capas a la izquierda o a la derecha en la Figura 2.

55 La presión o fuerza requerida para el apelmazamiento y la consolidación (o para evitar la desconsolidación antes del enfriamiento) también se puede aplicar mediante un miembro independiente, tal como una zapata o un rodillo 60, Figura 2, que se dispone cerca de la bocina 30. Si la bocina 30 se mueve a través de la superficie 42, entonces la

zapata 60 prolonga el periodo de tiempo en que la fuerza de consolidación se aplica sobre el emplazamiento, en comparación a cuando la fuerza de consolidación se aplica solo mediante la propia bocina.

5 La dirección de las fibras de refuerzo de cada capa puede ser la misma en cada capa, pero típicamente no es así. Las fibras se pueden disponer en una agrupación ordenada, pueden estar dispuestas aleatoriamente, pueden ser tejidas o unidireccionales, pueden estar fabricadas con diversos materiales tales como vidrio, carbono, aramida o sustancias cerámicas. La matriz de resina es de un material termoendurecible.

10 Se realizaron unos ensayos de optimización del procedimiento usando una bocina ultrasónica de 40 kHz y suministro de corriente, proporcionada por Branson Ultrasonics, montada sobre una máquina de bobinado de filamentos EnTec de doble eje. A la bobinadora se sujetó un armazón de soporte que alojaba la bobina, los puntos de fijación para los cilindros neumáticos que aplican presión sobre la boquilla de la bocina, y un rodillo seguidor de acero.

15 Como se esbozó anteriormente en los "Antecedentes de la invención", la consolidación de las capas de materiales termoendurecibles reforzados con fibras de la técnica anterior, generalmente, requiere formar un conjunto apilado de varias capas, usar gases calientes para pegar las capas entre sí, colocar este conjunto apilado en una bolsa de vacío y, luego, usar una estufa o un autoclave para apelmazar las capas, y consolidar las capas al menos parcialmente. Luego, al conjunto apilado se añaden más capas y el autoclave se usa de nuevo para apelmazar y consolidar al menos parcialmente esas capas.

20 El aumento de temperatura producido por el autoclave disminuye la viscosidad de la resina termoendurecible provocando que fluya. El vacío y el aumento de presión producidos por el autoclave apelmazan las capas, eliminando cualquier hueco o aire retenido entre las capas. Siendo el propósito asegurar que la geometría y el espesor de la pieza sean cercanos a las dimensiones finales (es decir, "cercanos a la forma final") cuando finalmente se coloca en el autoclave para el curado final, evitando de este modo que en las fibras de la pieza curada aparezcan deformaciones, arrugas u ondulaciones.

25 Este procedimiento, por ejemplo la colocación por gas caliente con apelmazamiento intermedio y curado final en autoclave, es costoso y requiere tiempo. Por otra parte, los autoclaves son caros e incluso el mayor autoclave disponible en el comercio no puede alojar algunas piezas de material compuesto fabricadas con materiales termoendurecibles reforzados con fibras, debido a su tamaño y forma.

30 En la técnica anterior, en el procedimiento de colocación de cintas es deseable que el curado de la resina no avance significativamente. Esto se debe a que más adelante se necesita que la resina fluya para consolidar la pieza en el autoclave. Sin embargo, esta capacidad de la resina de fluir bajo la presión del autoclave impone el requisito de un utillaje caro para mantener la geometría deseada de la pieza durante el curado. El coste de este utillaje caro puede aumentar significativamente el coste del producto resultante, particularmente para ciclos de producción pequeños.

35 Por otra parte, las temperaturas y presiones precisas que se emplean en el autoclave varían de conjunto apilado en conjunto apilado y de pieza en pieza, requiriendo a menudo alguna experimentación antes de que se consiga un apelmazamiento y una consolidación correctos.

40 En la presente invención, se eliminan las repetidas etapas de apilado y apelmazamiento de los métodos de la técnica anterior. En su lugar, las capas adyacentes se apelmazan al menos parcialmente, o incluso completamente, conforme se tienden las capas. El resultado es al menos la parcial eliminación del tiempo y del coste asociados con los métodos de apelmazamiento de piezas de material compuesto de la técnica anterior. Además, el anidamiento de las fibras producido por vibración puede mejorar las propiedades interlaminares. A veces no se requiere un utillaje caro para mantener el conjunto apilado en su forma deseada durante el curado final en una estufa. Generalmente, tampoco se requieren gases calientes, lo que reduce significativamente el coste de la pieza o del producto resultante.

45 Adicionalmente, los ensayos del procedimiento han mostrado que el cabezal ultrasónico no solo puede consolidar las capas hasta cerca de la forma final, también puede hacer progresar el curado suficientemente de modo que el conjunto apilado acabado se pueda curar con un mínimo utillaje en una estufa en lugar de un autoclave, usando un procedimiento conocido como curado de estado sólido. Generalmente, para mantener el conjunto apilado en su forma deseada durante el curado final en una estufa no se requiere un utillaje caro.

50 Según esta invención, una pieza conformada con la forma final o cercana a la forma final y el apelmazamiento de cada capa con las capas adyacentes se consiguen mediante orientar la boquilla de la bocina ultrasónica en un ángulo sobre la capa de más arriba a ser consolidada con el conjunto apilado, y energizar la bocina para producir una onda transversal en las capas que no se disipa por las fibras de las capas y que calienta la resina termoendurecible para reducir su viscosidad por medio de la fuerza de cizallamiento producida en las capas. El nivel de energía de la onda transversal se escoge de modo que se reduzca suficientemente la viscosidad de la resina termoendurecible hasta el punto de que las capas se puedan apelmazar mediante la presión aplicada a la pila de capas por medio de la propia bocina ultrasónica y/o un rodillo que sigue a la bocina conforme se mueve sobre las capas. Sin embargo, el nivel de energía de la onda transversal es menor que el nivel que provocaría la completa reticulación química de la resina termoendurecible, para permitir por lo tanto que otra capa se tienda y se reticule

químicamente con la capa o capas de debajo de ella. De esta forma, las capas se apelmazan y al menos parcialmente se consolidan conforme se tiende cada capa, reduciendo o eliminando la necesidad de repetidos tratamientos en autoclave, un utillaje caro y el uso de gases calientes.

5 Como se muestra en la Figura 3, en los materiales compuestos termoplásticos no es preocupante la reticulación durante la fluidización ya que la matriz termoplástica experimenta una transición reversible de sólido a líquido a una temperatura predeterminada. Por el contrario, en los materiales termoendurecibles, Figura 4, la viscosidad de la resina es dependiente tanto de la temperatura como del tiempo y no se puede disminuir de nuevo después de la reticulación de las moléculas de la resina, lo que sucede en algún punto después del punto A de la curva 60. Generalmente, se entiende que la reacción exotérmica comienza alrededor del punto C. La gelificación se produce en algún punto cercano al punto A. En el punto D, la resina está completamente curada. Entre los puntos B y A es posible el apelmazamiento, pero conforme nos aproximamos a A se dificulta la capacidad de las capas apelmazadas para volver a fluir durante las posteriores etapas de tratamiento. Esto puede suponer un problema si el apelmazamiento intermedio solo consigue una consolidación parcial y se desea una consolidación adicional durante el curado final.

15 De este modo, la bocina ultrasónica se debe energizar hasta un nivel tal que sea posible el apelmazamiento de las capas, pero no demasiado alto de modo tal que todavía se pueda tender otra capa y reticular su resina con la resina termoendurecible de la capa o capas de debajo. Aunque el nivel de energía preferido es el que da lugar a una viscosidad de la resina termoendurecible entre los puntos C y A, puede ser deseable energizar la bocina a unos niveles de energía que den lugar a una viscosidad cercana a B o cercana a A, dependiendo de la secuencia global del procedimiento. Por ejemplo, si el objetivo también es eliminar una parte de los apelmazamientos intermedios pero conservar el autoclave para el curado final, entonces es suficiente una viscosidad cercana a B, lo que da lugar a una consolidación parcial. Por el contrario, si el objetivo es consolidar completamente la pieza y estabilizar su geometría para permitir el curado de estado sólido en una estufa, entonces es deseable una viscosidad cercana al punto A. Dependiendo del tamaño, la configuración, el número de capas y el uso final del material compuesto, los ultrasonidos se pueden emplear únicamente para reducir el número de apelmazamientos intermedios. En otros casos, son consecuencia de la metodología de la presente invención las piezas cercanas a la forma final completamente apelmazadas y consolidadas adecuadas para el curado de estado sólido en una estufa. Estos diferentes estados de la resina se pueden conseguir variando la velocidad de avance del cabezal y la potencia (amplitud de la vibración y/o presión) de la bocina ultrasónica. De esta forma, el procedimiento de la invención proporciona una progresión controlada y unos niveles seleccionados de avance del curado.

20 En un ejemplo, una cinta "prepreg" de fibra de carbono de 15,24 cm (6 inches) de ancho y 15,24 cm (6 inches) de largo, con fibras unidireccionales, se tendió sobre un mandril plano para formar la capa primera. El eje central de una bocina ultrasónica con una boquilla biselada de una anchura de 1,27 cm (0,5 inches) se orientó con un ángulo de aproximadamente 30 grados respecto a la superficie del mandril, se energizó para vibrar a una frecuencia de 40 kHz, y se hizo funcionar sobre la cinta en múltiples pasadas paralelas para cubrir y apelmazar toda la superficie. Las pasadas de la bocina se hicieron en la dirección de los haces de la fibra a una velocidad de aproximadamente 2,25 cm/s (1 inch/sec). La bocina se fijó para un factor potenciador de 1:1 y una amplitud de 80%.

35 A continuación, otra cinta "prepreg" de fibra de carbono de 15,24 cm (6 inches) de ancho y 15,24 cm (6 inches) de largo, con fibras unidireccionales situadas a 90 grados respecto a la orientación de la capa primera, se tendió sobre la capa primera para formar la capa segunda de la pila de capas. De nuevo, la bocina ultrasónica se hizo funcionar con un ángulo sobre la cinta y se movió sobre la capa segunda en la dirección de los haces de fibra para, al menos parcialmente, consolidar la capa primera con la capa segunda y apelmazar el conjunto apilado consistente en dos capas. La bocina ultrasónica se dispuso como se muestra en la Figura 1.

45 El nivel de energía aplicado mediante la bocina en ángulo para el material "prepreg" fue suficiente para reducir la viscosidad de la resina termoendurecible en cada pieza de cinta de las dos capas para conseguir al menos una consolidación parcial y un apelmazamiento, pero no suficientemente alta como para provocar la reticulación química completa de la resina, lo que dificultaría la capacidad de apilar otra capa y finalmente el reticulado químico de la resina de esa capa con la resina de las capas inferiores de la pila. Se configuró un rodillo para que siguiera estrechamente a la bocina para ayudar en el procedimiento de apelmazamiento, como se muestra en la Figura 2.

50 Se repitió este procedimiento hasta que se apilaron veinticuatro capas para conseguir el espesor de pieza deseado, cada capa subsiguiente se fabricó con una cinta "prepreg" que tenía los haces de fibra orientados en un ángulo recto con respecto a los haces de fibra de la capa de debajo, excepto en el medio de la pieza de material compuesto resultante donde se consolidaron entre sí dos capas a cero grados para la simetría del plano central de la pieza resultante.

55 De esta manera se fabricaron dos lotes de probetas, y posteriormente uno de los lotes se sometió a un curado final en un autoclave a 0,689 MPa (100 psi), mientras que el otro se sometió a un curado final en una estufa.

Se fabricó un conjunto similar de probetas, sin ultrasonidos, y luego se curaron en un autoclave. Los tres lotes de probetas resultantes de material compuesto tenían un espesor de 3,3 mm (0,130 inches).

Para cada uno de los tres lotes de probetas se midió la resistencia al cizallamiento de viga corta, y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1

Método de apelmazamiento	Espesor resultante [mm (inches)]	Método de curado	Resistencia al cizallamiento de viga corta [MPa (psi)]	Coefficiente de variación
Estratificación ultrasónica en cinta	3,3 (0,130)	Autoclave	80,7 (11.700)	3%
Estratificación ultrasónica en cinta	3,3 (0,130)	Estufa	77,2 (11.200)	5%
Bolsa de vacío en caliente	3,3 (0,130)	Autoclave	74,5 (10.800)	10%

5 De este modo, el procedimiento de estratificación ultrasónica en cinta de esta invención dio lugar a unas piezas, de
 10 resistencia alta y completamente apelmazadas y curadas, de un material compuesto fabricado a partir de capas reforzadas con fibras, de resina termoendurecible, sin el uso de un autoclave en ninguna de las etapas de apelmazamiento o curado. En la técnica anterior, el apelmazamiento se realizaba con operaciones repetidas de bolsa de vacío, o de tratamiento en autoclave, y el curado se realizaba en un autoclave. En la presente invención, el apelmazamiento se produjo sobre la marcha conforme las capas se tendían y el curado se realizó mediante un autoclave, un curado en estufa, o mediante la acción de una bocina ultrasónica conforme las capas se tendían.

15 Se realizó otro experimento en el que una máquina robotizada de colocación de fibras, que normalmente emplea gases calientes para el calentamiento y tratamientos repetidos en autoclave o bolsa de vacío para el apelmazamiento, se modificó para incluir unas bocinas ultrasónicas dispuestas en ángulo respecto a la superficie del material estratificado que apelmazaron las capas de material estratificado conforme se tendían, eliminando la necesidad de repetidas operaciones de apelmazamiento. La máquina robotizada de colocación de fibras se usó para fabricar un panel "isogrid" de material compuesto de la geometría mostrada en la Figura 5. El panel "isogrid" se seleccionó para comparación porque la consolidación de las intersecciones 100 (nudos) del rigidizador usando gas caliente había sido problemática. La fabricación del panel "isogrid" manifestó una colocación del haz de filamentos exacta y precisa para conseguir los aglomerados de capas unidireccionales que forman las costillas de refuerzo. Se
 20 consiguieron unos altos niveles de consolidación en los nudos. De este modo, el procedimiento ultrasónico de estratificación en cinta de la presente invención resultó adecuado para procedimientos de fabricación a gran escala. En la presente invención, la bocina ultrasónica se energizó solo conforme las capas se iban tendiendo cerca de cada nudo, dando lugar a una consolidación en los nudos. De este modo, el experimento confirmó la acción de consolidación controlada alcanzable mediante el método de la presente invención, a gran diferencia de los métodos de gas caliente de la técnica anterior que no son controlables, ya que el gas caliente no se puede conectar y desconectar tan rápidamente como se puede energizar y desenergizar una bocina ultrasónica, y la presión de un rodillo rígido no proporciona la buena consolidación alcanzable con una fuerza vibratoria.

25 La Figura 6 muestra una estructura cilíndrica fabricada según el método de la presente invención. En un mandril se tendieron muchas capas (70-100). En la técnica anterior, que usa gases calientes, se requerían numerosas operaciones de apelmazamiento que usaban una bolsa de vacío y un autoclave conforme las capas se aglomeraban. Por otra parte, al inspeccionarlas se observó que la capa añadida después de una operación de apelmazamiento no estaba completamente consolidada con las capas anteriores y que las capas tenían estriaciones.
 30

35 En la presente invención, por el contrario, se requirieron significativamente menos operaciones de apelmazamiento y se consiguió una consolidación mejor. Por otra parte, debido a la acción vibratoria de la bocina ultrasónica, la capa que se tendió inmediatamente después de una operación de apelmazamiento se consolidó completamente con la capa anterior y no se observaron estriaciones. En su lugar, la acción de la bocina ultrasónica provocó una mejora del anidamiento de las fibras entre las capas.

40 Como se indicó antes, en la presente invención las tradicionales operaciones repetidas de apelmazamiento en bolsa de vacío y en estufa o autoclave, o bien se reducen o se eliminan según la presente invención, las estriaciones entre las operaciones de apelmazamiento se reducen o eliminan, y es posible un nivel de control mucho más alto conforme las capas se apelmazan. El curado final se puede efectuar en un autoclave, en una estufa, o por medio del uso de una bocina ultrasónica según esta invención.

45 Aunque las características específicas de la invención se muestran en unos dibujos y no en otros, esto se hace solo por conveniencia ya que cada característica se puede combinar con cualquiera o con todas las demás características según la invención.

A los expertos en la técnica se les ocurrirán otras realizaciones que están dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un método de fabricación de una estructura de material compuesto reforzado con fibras, de matriz termoendurecible, comprendiendo dicho método:
- 5 ensamblar una pila de capas de material termoendurecible reforzado con fibras (10, 14, 16);
acoplar una bocina ultrasónica (30) con la superficie superior de la capa de más arriba;
orientar la bocina (30) en un ángulo agudo (θ) con respecto a la superficie superior;
energizar la bocina (30) para producir una onda transversal (44) en las capas, para calentar las capas (10, 14, 16); y
- 10 proporcionar un movimiento relativo entre la bocina (30) y la capa de más arriba para consolidar las capas (10, 14, 16), siendo el nivel de energía aplicado mediante la bocina (30) suficiente para reducir la viscosidad de la resina termoendurecible hasta el punto de que las capas (10, 14, 16) se puedan apelmazar, pero no lo suficientemente alto como para reticular completamente la resina, de modo que se pueda reticular otra capa con la capa de más arriba; y
- aplicar presión a las capas conforme la bocina (30) se mueve, para apelmazar las capas (10, 14, 16).
- 15 2.- El método de la reivindicación 1, en el que las capas de material termoendurecible comprenden más de 40% en volumen de fibras.
- 3.- El método de la reivindicación 1, que además incluye la etapa de someter la pila de capas a un curado en un autoclave o una estufa.
- 20 4.- El método de la reivindicación 1, en el que se depositan una o más capas sobre la pila de capas previamente ensamblada y consolidada.
- 5.- El método de la reivindicación 1 usado conjuntamente con el bobinado de filamentos, la colocación de cintas, la colocación de fibras o la colocación de haces de filamentos, para depositar y consolidar materiales compuestos reforzados con fibras, de matriz termoendurecible.

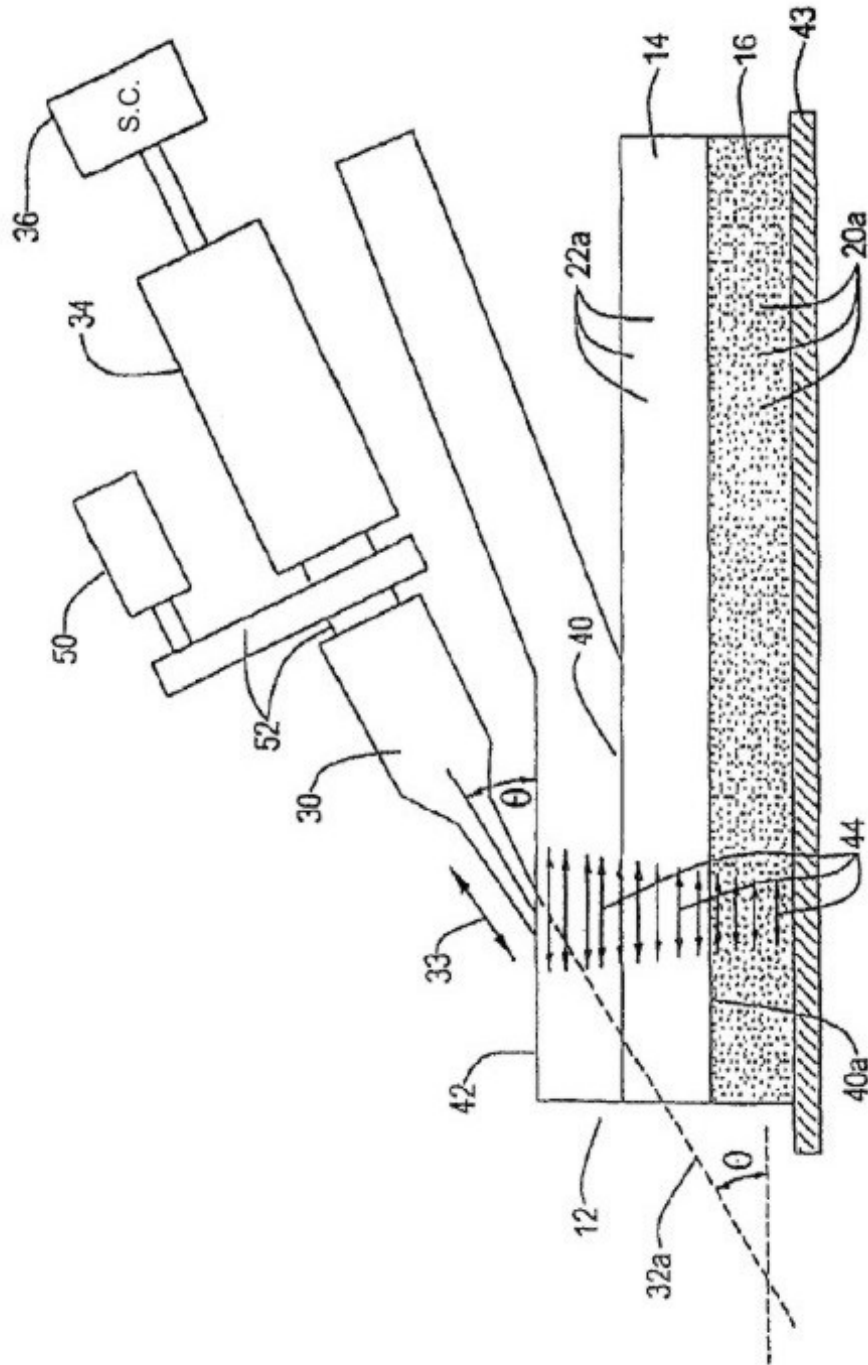


FIG. 1

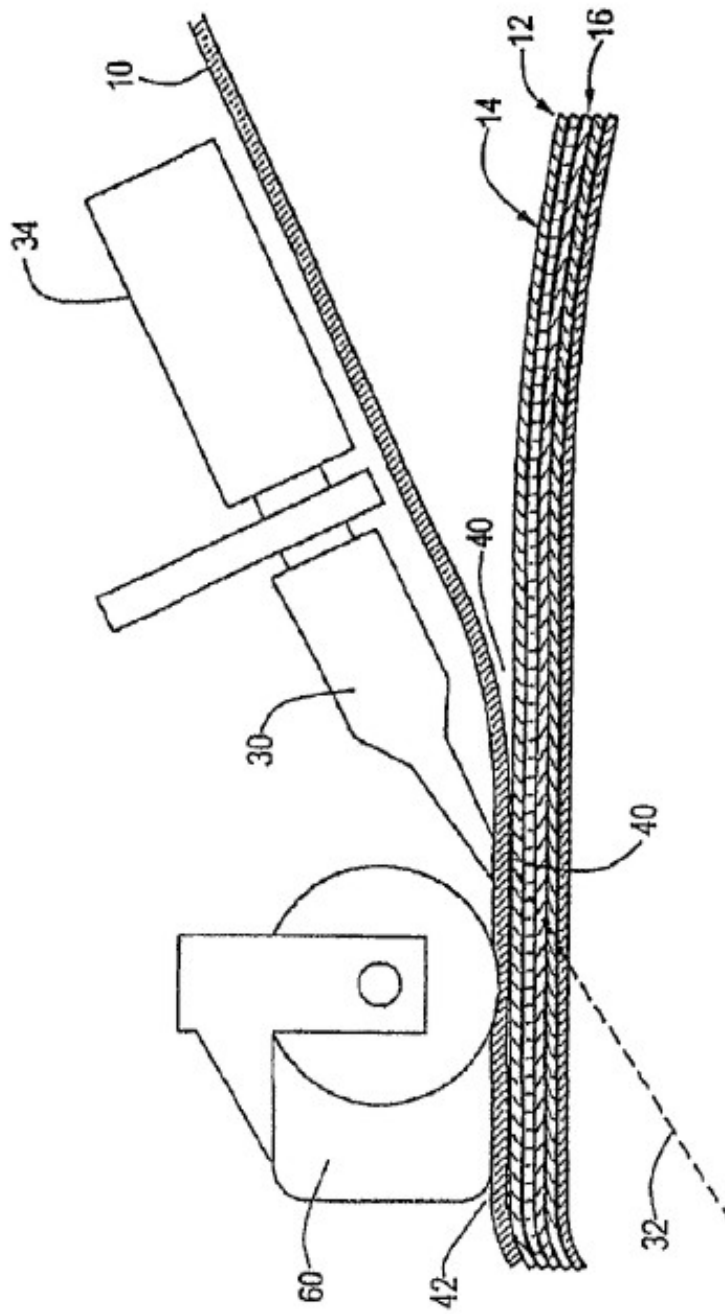


FIG. 2

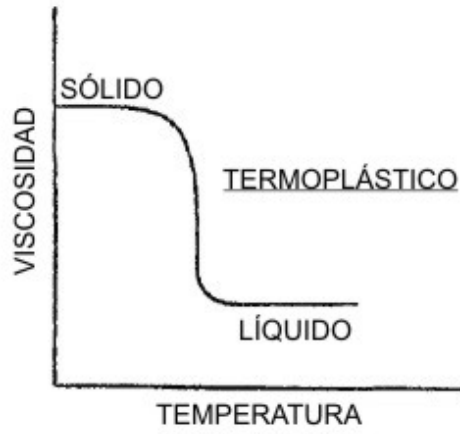


FIG. 3



FIG. 4

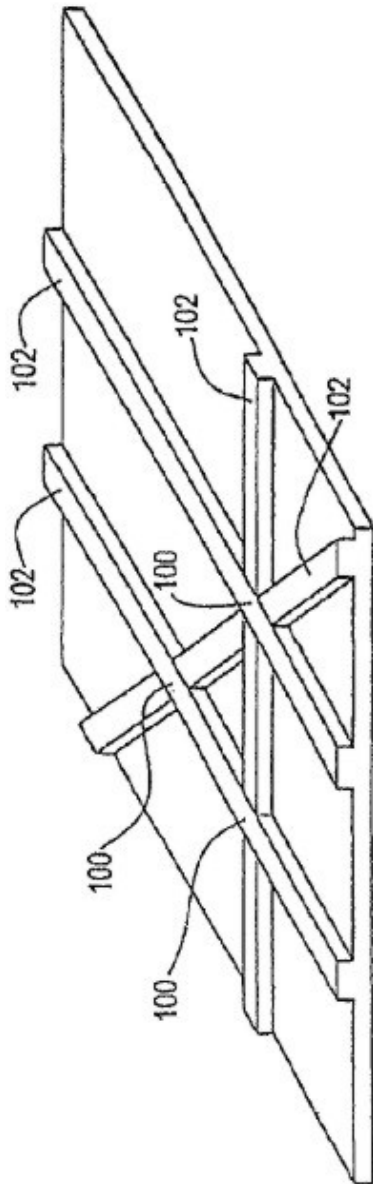


FIG. 5

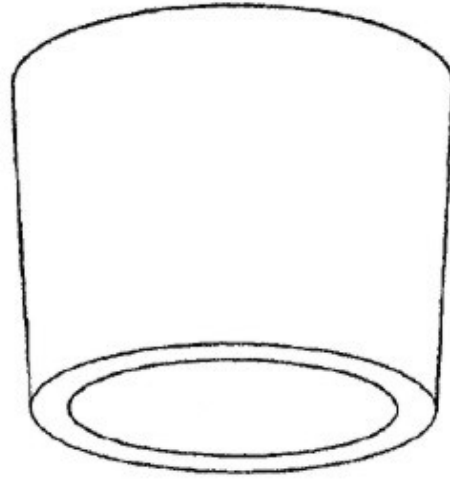


FIG. 6