



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0922074-7 B1



(22) Data do Depósito: 26/11/2009

(45) Data de Concessão: 04/06/2019

(54) Título: PÁ, TURBINA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PÁ DE TURBINA.

(51) Int.Cl.: B29C 70/24; D03D 25/00; F01D 5/28; B29D 99/00.

(30) Prioridade Unionista: 28/11/2008 FR 0858090.

(73) Titular(es): SNECMA; HERAKLES.

(72) Inventor(es): DOMINIQUE COUPE; CLÉMENT ROUSSILLE; JONATHAN GOERING; JULIEN MATEO; NICOLAS EBERLING- FUX; GUILLAUME RENON.

(86) Pedido PCT: PCT FR2009052309 de 26/11/2009

(87) Publicação PCT: WO 2010/061140 de 03/06/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 30/05/2011

(57) Resumo: PÁ, TURBINA, E PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PÁ DE TURBINA A presente invenção se refere a uma pá de turbina de material compósito que compreende um reforço fibroso densificado por uma matriz e fabricado por um processo que compreende: a formação por tecelagem tridimensional de um esboço fibroso (100) em peça única; a moldagem do esboço fibroso para a obtenção de uma pré-forma fibrosa em peça única, com uma primeira porção formando uma pré-forma de lâmina e base de pá e ao menos uma segunda porção formando uma pré-forma de plataforma interna ou externa de pá; e a densificação da pré-forma por uma matriz para a obtenção de uma pá de material compósito com um reforço fibroso constituído pela pré-forma e densificado pela matriz, e formando uma peça única com plataforma interna e/ou externa integradas.

RELATÓRIO DESCRITIVO

Pedido de patente de invenção para “PÁ, TURBINA, E PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PÁ DE TURBINA”

Fundamentos da invenção

5 A presente invenção se refere a pás de turbomáquinas de material compósito que compreendem um reforço fibroso densificado por uma matriz.

O setor técnico visado é o de pás de turbinas a gás para motores aeronáuticos ou turbinas industriais.

10 A fabricação de pás de material compósito para turbomáquinas já foi proposta. Pode-se fazer referência, por exemplo, ao documento EP1526285, que descreve a fabricação de uma pá de ventilador através da fabricação de uma pré-forma fibrosa por tecelagem tridimensional e densificação da pré-forma por uma matriz orgânica.

15 Além disso, para a fabricação de peças estruturais de turbomáquinas expostas em serviço a temperaturas elevadas, a utilização de materiais compósitos termoestruturais e especialmente de materiais compósitos de matriz cerâmica (CMC) foi proposta. Com efeito, em comparação com ligas metálicas, esses materiais podem apresentar uma maior resistência a temperaturas elevadas e uma menor massa. Particularmente para as turbinas a gás de motores aeronáuticos, a diminuição da massa e a redução de emissões poluentes através do aumento da temperatura são buscadas.

Objeto e descrição resumida da invenção

25 É portanto desejável a disponibilidade de pás de turbomáquinas de material compósito, especialmente, porém não necessariamente, de material compósito termoestrutural, tal como CMC,

para turbinas ou compressores de turbomáquinas, e as pás devem apresentar as propriedades mecânicas requisitadas ao mesmo tempo em que apresentam formas relativamente complexas.

Com este propósito, de acordo com a presente invenção, é
5 proposto um processo de fabricação de uma pá de turbomáquina de material compósito que compreende um reforço fibroso densificado por uma matriz, o processo compreendendo:

- a fabricação por tecelagem tridimensional de um esboço fibroso em uma única peça,
- 10 - a moldagem do esboço fibroso para se obter uma pré-forma fibrosa em peça única, com uma primeira parte formando uma pré-forma de asa e raiz da pá e ao menos uma segunda parte formando uma pré-forma de plataforma interna ou externa da pá, e
- a densificação da pré-forma por uma matriz para se
15 obter uma pá de material compósito com um reforço fibroso constituído pela pré-forma e densificado pela matriz, e formando uma única peça com as plataformas interna e/ou externa integradas.

Ao se fabricar o reforço fibroso da pá a partir de um esboço obtido em peça única por tecelagem tridimensional, pode-se assegurar uma
20 imbricação mútua ao menos parcial entre as partes do reforço fibroso correspondentes às partes da pá que formam a asa e a raiz e à(s) que forma(m) a(s) plataforma(s) interna ou externa.

Isso contribui às propriedades mecânicas necessárias a uma pá com plataformas interna e/ou externa integradas, especialmente na região
25 da ligação entre a parte que forma a asa e a raiz e a parte ou cada uma das partes que formam as plataformas interna e externa.

Segundo uma particularidade vantajosa do processo, na direção longitudinal do esboço fibroso correspondente à direção

longitudinal da pá a ser fabricada, o esboço fibroso compreende um primeiro conjunto de várias camadas de fios que são ligados entre si para formar uma primeira porção do esboço correspondente à pré-forma da asa e da raiz da pá, e um segundo conjunto de várias camadas de fios que são
5 ligados entre si ao menos localmente para formar ao menos uma segunda porção do esboço correspondente a uma pré-forma de plataforma interna ou externa da pá, sendo que os fios do primeiro conjunto de camadas de fios não são ligados aos fios do segundo conjunto de camadas de fios, e o primeiro conjunto de camadas de fios é atravessado pelos fios do segundo
10 conjunto de camadas de fios na região de localização da segunda porção, ou de cada segunda porção, do esboço.

A disposição das zonas desligadas permite que a pré-forma fibrosa seja moldada sem cortes dos fios de ligação que poderiam diminuir a resistência mecânica do reforço fibroso, e conseqüentemente da pá
15 fabricada.

Segundo uma outra particularidade do processo, o esboço fibroso é tecido com um segundo conjunto contínuo de camadas de fios, e a moldagem do esboço fibroso compreende a eliminação por corte de partes do segundo conjunto contínuo de camadas de fios externas à segunda
20 porção, ou a cada segunda porção, do esboço fibroso.

Segundo ainda outra particularidade do processo, no local ou pelo menos em um dos locais em que o primeiro conjunto de camadas de fios é atravessado pelos fios do segundo conjunto de camadas de fios, a interseção entre uma camada de fios do primeiro conjunto e uma camada
25 de fios do segundo conjunto segue uma linha não ortogonal à direção longitudinal do esboço fibroso. Pode-se assim fabricar uma pá de material compósito com uma plataforma interna e/ou externa que se estenda de um modo geral não perpendicularmente à direção longitudinal da pá.

Segundo ainda outra particularidade do processo, na primeira porção do esboço fibroso e em uma direção correspondente à que se estende ao longo do perfil de uma asa de espessura variável na pá a ser fabricada, o número de camadas de fios na direção longitudinal no primeiro conjunto de camadas de fios é constante. Os fios do primeiro conjunto de
5 fios podem então ser de título e/ou contextura variável.

Vantajosamente, uma faixa compreendendo uma sucessão de esboços fibrosos é fabricada por tecelagem tridimensional. Esses esboços podem em seguida ser cortados na faixa. Os esboços podem ser tecidos
10 com a direção longitudinal da pá a ser fabricada na direção de trama ou na direção de urdidura.

De acordo com a presente invenção, é também proposta uma pá de turbomáquina de material compósito que compreende um reforço fibroso obtido por tecelagem tridimensional de fios e densificado por uma
15 matriz, sendo que a pá compreende uma primeira porção que constitui a asa e a raiz da pá formando uma única peça com ao menos uma segunda porção que constitui uma plataforma interna ou externa da pá, e as duas porções de reforço fibroso correspondentes à primeira e à segunda porções da pá são ao menos em parte mutuamente entrelaçadas, com os fios de uma
20 das porções de reforço fibroso penetrando na outra porção de reforço fibroso.

A pá pode ser feita de um material compósito de matriz cerâmica.

Segundo uma particularidade da pá, os fios que constituem a
25 porção do reforço fibroso correspondente à segunda porção da pá atravessam a porção do reforço fibroso correspondente à primeira porção da pá.

A asa da pá pode possuir um perfil de espessura variável, ao longo do qual a porção de reforço fibroso correspondente à primeira porção da pá tem, na direção longitudinal da pá, um número constante de camadas de fios com um título e/ou contextura variável, ou um número variável de camadas de fios.

A invenção também propõe uma turbomáquina equipada com uma pá como definida acima.

Breve descrição dos desenhos

A invenção será mais bem compreendida a partir da descrição a seguir, feita a título indicativo, porém não limitativo, com referência aos desenhos anexos, nos quais:

- a Figura 1 é uma vista em perspectiva de uma pá de turbomáquina com plataformas interna e externa integradas;
- a Fig. 2 ilustra de forma bem esquemática a disposição de duas camadas de fios em um esboço fibroso tecido tridimensionalmente destinado à fabricação de uma pré-forma fibrosa para uma pá como a ilustrada na Figura 1;
- as Figuras 3, 4 e 5 ilustram as etapas sucessivas de fabricação de uma pré-forma fibrosa para uma pá como ilustrada na Figura 1, a partir do esboço fibroso da Figura 2;
- a Figura 6 é uma vista em corte que mostra o perfil, em projeção plana, da lâmina de uma pá como a ilustrada na Figura 1;
- a Figura 7 é uma vista em corte de um conjunto de camadas de fios de urdidura que permite a obtenção de um perfil como o ilustrado na Figura 6;
- as Figuras 8A e 8B são vistas em corte de urdidura que mostram um modo de tecelagem do esboço fibroso da Figura 2;

- a Figura 9 é uma vista parcial em corte segundo um plano paralelo às direções de urdidura e trama em uma porção do esboço fibroso da Figura 2 correspondente ao local da junção entre a lâmina e a plataforma interna da pá;
- 5 - a Figura 10 é uma vista parcial em corte em uma porção do esboço fibroso da Figura 2 correspondente ao local da junção entre a lâmina e a plataforma externa da pá;
- a Figura 11A é uma vista em corte de trama que mostra um exemplo de disposição de fios de trama em uma porção de esboço
10 correspondente a uma porção de raiz de lâmina;
- as Figuras 11B a 11D são vistas em corte de trama que mostram planos de urdidura para um exemplo de tecelagem tridimensional (multicamadas) na porção de esboço fibroso da Figura 11A;
- a Figura 12 é uma vista esquemática parcial em corte
15 que mostra outro modo de realização de uma porção do esboço correspondente a uma raiz de lâmina;
- as Figuras 13 e 14 ilustram bem esquematicamente dois modos de realização de uma faixa fibrosa tecida obtida por tecelagem tridimensional compreendendo uma pluralidade de esboços fibrosos como
20 o da Figura 2;
- a Figura 15 indica as etapas sucessivas de um modo de realização de um processo de fabricação de uma pá de turbomáquina de acordo com a invenção; e
- a Figura 16 indica as etapas sucessivas de outro modo de
25 realização de um processo de fabricação de uma pá de turbomáquina de acordo com a invenção.

Descrição detalhada de modos de realização

A invenção é aplicável a diferentes tipos de pás de turbomáquinas com plataformas interna e/ou externa integradas, especialmente pás de compressores e de turbinas para diferentes corpos de turbinas a gás, como, por exemplo, uma pá para um rotor móvel de turbina de baixa pressão (BP), tal como a ilustrada na Fig. 1.

A pá 10 da Fig. 1 compreende, de forma bem conhecida, uma lâmina 20, uma raiz 30 formada por uma porção de maior espessura, por exemplo, com seção em forma de bulbo, prolongada por uma asa 32, uma plataforma interna 40 situada entre a asa 32 e a lâmina 20, e uma plataforma externa na vizinhança da extremidade livre da lâmina.

A lâmina 20 se estende na direção longitudinal entre a plataforma interna 40 e a plataforma externa 50 e apresenta em sua seção transversal um perfil curvilíneo de espessura variável entre sua borda de ataque 20a e sua borda de fuga 20b.

A pá 10 é montada em um rotor de turbina (não mostrado) por encaixe da raiz 30 em um compartimento de forma correspondente disposto na periferia do rotor. A raiz 30 se prolonga pela asa 32 para se conectar à face interna (ou inferior) da plataforma interna 40.

Em sua extremidade radial interna, a lâmina 20 se conecta à plataforma interna 40 sobre uma face externa (ou superior) 42 da plataforma que delimita, no interior, o caminho de escoamento do fluxo gasoso na turbina. Em suas porções de extremidade a montante e a jusante (no sentido f do fluxo da corrente gasosa), a plataforma é terminada pelas abas 44 e 46. No exemplo ilustrado, a face 42 da plataforma é inclinada formando globalmente um ângulo não nulo α em relação à normal à direção longitudinal da pá. Dependendo do perfil desejado para a superfície interna da passagem de fluxo da corrente gasosa, o ângulo α poderá ser nulo, ou a

face 42 poderá possuir um perfil globalmente não retilíneo, como, por exemplo, curvilíneo.

Em sua extremidade radial externa, a lâmina se conecta à plataforma externa 50 em uma face interna (inferior) 52 da plataforma externa que delimita, exteriormente, a passagem de escoamento do fluxo gasoso. Do lado externo (superior), a plataforma externa define uma depressão ou banheira 54. Ao longo das bordas a montante a jusante da banheira 54, a plataforma externa comporta lâminas 56 com perfis em forma de dentes que possuem extremidades que podem penetrar em uma camada de material abrasível de um anel de turbina (não mostrado) para reduzir a folga entre a ponta da lâmina e o anel de turbina. No exemplo mostrado, a face 52 da plataforma externa se estende substancialmente perpendicularmente à direção longitudinal da lâmina. Em uma variante, dependendo do perfil desejado para a superfície externa da passagem de fluxo da corrente gasosa, a face 152 pode ser inclinada de modo a formar um ângulo geralmente não nulo em relação à normal à direção longitudinal da lâmina, ou a face 52 pode ter um perfil que seja globalmente não retilíneo, por exemplo, que seja curvilíneo.

Em sua extremidade radial externa,

A Fig. 2 mostra bem esquematicamente um esboço fibroso 100 a partir do qual uma pré-forma fibrosa de pá pode ser moldada a fim de, após densificação por uma matriz e uma eventual usinagem, se obter uma pá de material compósito com plataformas interna e externa integradas, tal como a ilustrada na Fig. 1.

O esboço 100 compreende duas porções 102, 104 obtidas por tecelagem tridimensional ou tecelagem multicamadas, sendo somente os envoltórios dessas duas porções mostrados na Fig. 2. A porção 102 é destinada, após moldagem, a constituir uma porção de pré-forma fibrosa de

pá correspondente a uma pré-forma da lâmina e da raiz da pá. A porção 104 é destinada, após moldagem, a constituir as porções de pré-forma fibrosa da pá correspondentes às pré-formas das plataformas interna e externa.

5 As duas porções 102, 104 têm a forma de faixas que se estendem de um modo geral em uma direção correspondente à direção longitudinal X da pá a ser fabricada. A faixa fibrosa 102 apresenta, em sua porção destinada a formar uma pré-forma de lâmina, uma espessura variável determinada em função da espessura do perfil da lâmina da pá a ser fabricada. Em sua porção destinada a formar uma pré-forma de raiz, a
10 faixa fibrosa 102 apresenta um excesso de espessura 103 determinado em função da espessura da raiz da pá a ser fabricada.

A faixa fibrosa 102 tem uma largura l selecionada em função do comprimento do perfil desenvolvido (em projeção) da lâmina e da raiz da pá a ser fabricada, enquanto que a faixa fibrosa 104 tem uma largura L ,
15 superior à l , escolhida em função dos comprimentos desenvolvidos para as plataformas interna e externa da pá a ser fabricada.

A faixa fibrosa 104 tem uma espessura substancialmente constante determinada em função das espessuras das plataformas interna e externa da pá a ser fabricada. A faixa 104 compreende uma primeira porção
20 104a que se estende ao longo e na vizinhança de uma primeira face 102a da faixa 102, uma segunda porção 104a que se estende ao longo e na vizinhança da segunda face 102b da faixa 102, e uma terceira porção 105a que se estende ao longo e na vizinhança da primeira face 102a da faixa 102.

As porções 104a e 104b se conectam através de uma porção de
25 conexão 140c que se estende transversalmente em relação à faixa 102 em um local correspondente ao da plataforma interna da pá a ser fabricada. A porção de conexão 140c atravessa a faixa 102 formando um ângulo α em relação à normal à direção longitudinal do esboço fibroso. As porções 104b

e 105a se conectam por uma porção de conexão 150c que se estende transversalmente em relação à faixa 102 em um local correspondente ao da plataforma externa da pá a ser fabricada. No exemplo ilustrado, a porção de conexão 150c atravessa a faixa 102 substancialmente perpendicularmente à direção longitudinal do esboço fibroso. Conforme a geometria desejada na região da plataforma externa da pá, a porção de conexão 150c pode atravessar a faixa 102 formando um ângulo não nulo em relação à normal à direção longitudinal do esboço, como para a plataforma interna. Além disso, o perfil da porção de conexão 140c e/ou da porção de conexão 150c pode ser curvilíneo ao invés de retilíneo como no exemplo ilustrado.

Como descrito mais detalhadamente adiante, as faixas 102 e 104 são tecidas simultaneamente por tecelagem tridimensional, mas sem ligação entre a faixa 102 e as porções 104a, 104b e 105a da faixa 104, e com vários esboços 100 tecidos e sucessivos de forma contínua na direção X .

As Figs. 3 a 5 mostram bem esquematicamente como uma pré-forma fibrosa com um formato próximo ao da pá a ser fabricada pode ser obtida a partir do esboço fibroso 100.

A faixa fibrosa 102 é cortada em uma extremidade no excesso de espessura 103, e em outra extremidade um pouco além da porção de conexão 150a para que se tenha uma faixa 102 de comprimento correspondente à dimensão longitudinal da pá a ser fabricada com uma porção inchada 130 formada pelo excesso de espessura 103 e situada em um local correspondente ao da raiz da pá a ser fabricada.

Além disso, cortes são feitos nas extremidades das porções 104a, 105a da faixa 104 e na porção 204b desta para deixar os segmentos 140a e 140b sobrando de cada lado da porção de conexão 140c, e os segmentos 150a e 150b em cada lado da porção de conexão 150c, como

mostra a Fig. 3. Os comprimentos dos segmentos 140a, 140b e 150a, 150b são determinados em função dos comprimentos das plataformas interna e externa da pá a ser fabricada.

Por causa do desligamento entre a faixa 102 do esboço fibroso, por um lado, e as porções 104a, 104b e 105a, por outro lado, os segmentos 140a, 140b, 150a e 150b podem ser dobrados perpendicularmente à faixa 102 sem o corte de fios para formar as placas 140, 150, como mostra a Fig. 4.

Uma pré-forma fibrosa 200 da pá a ser fabricada é em seguida obtida por moldagem com deformação da faixa 102 para reproduzir o perfil curvilíneo da lâmina da pá, e deformação das placas 140, 150 para reproduzir formas semelhantes às das plataformas interna e externa da pá, como mostra a Fig. 5. É obtida assim uma pré-forma com uma porção 220 de pré-forma de lâmina, uma porção 230 de pré-forma de raiz (com pré-forma de perna), e as porções 240, 250 das plataformas interna e externa.

Como descrito abaixo, as etapas da fabricação de uma pré-forma de pá a partir de um esboço fibroso são vantajosamente realizadas após o tratamento das fibras do esboço e a impregnação deste por uma composição de consolidação.

Um modo de tecelagem tridimensional do esboço fibroso 100 será em seguida descrito com mais detalhes.

Supõe-se que a tecelagem seja realizada com fios de urdidura se estendendo na direção longitudinal X do esboço, devendo ser observado que uma tecelagem com fios de trama nessa direção é igualmente possível.

A variação de espessura da faixa 102 ao longo de sua largura é obtida utilizando-se fios de urdidura de título variável. É possível, em uma variante, ou como complemento, fazer variar a contextura dos fios de urdidura (número de fios por unidade de comprimento na direção de

trama), com uma contextura menor permitindo um maior afinamento durante a moldagem da pré-forma.

Assim, para se obter um perfil de lâmina da pá tal como ilustrado em projeção plana na Fig. 6, pode-se utilizar três camadas de fios de urdidura de título e contextura variáveis como ilustrado na Fig. 7.

Em um exemplo de realização, os fios utilizados podem ser os fios de carbetto de silício (SiC) fornecidos sob a denominação “*Nicalon*” pela companhia japonesa *Nippon Carbon* e com um título (número de filamentos) de 0,5K (500 filamentos).

A urdidura é formada com fios de SiC de 0,5K e fios de SiC de 1K obtidos pela reunião de dois fios de 0,5K, sendo os dois fios reunidos por cobertura. A cobertura é realizada vantajosamente com um fio de caráter fugaz suscetível de ser eliminado após a tecelagem como, por exemplo, um fio de álcool polivinílico (PVA) eliminável por dissolução em água.

A Tabela I abaixo fornece, para cada coluna de fios de urdidura, a contextura (número de fios/cm ao longo do perfil), o número de fios de 0,5K, o número de fios de 1K, e a espessura do perfil em mm, sendo que essa espessura varia entre 1 mm e 2,5 mm, aproximadamente.

20

Tabela I

Coluna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Contextura	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6
n° de fios 0,5K	3	3	3	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3
n° de fios 2x0,5K	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3	1	2	0
Espessura	1	1	1	1	1	1	1,2	1,5	2	2,2	2,4	2,5	2,4	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,2

Naturalmente, dependendo dos títulos de fios disponíveis, outras combinações de números de camadas de fios e de variações de contextura e de título podem ser adotadas para o perfil a ser obtido.

As Figs. 8A, 8B mostram, em corte em urdidura, dois planos sucessivos de um ligamento que pode ser utilizado para a tecelagem do esboço fibroso 100 fora do excesso de espessura 103.

5 A faixa 102 do esboço fibroso 100 compreende um conjunto de camadas de fios de urdidura, sendo o número de camada, por exemplo, igual a três (camadas, C_{11} , C_{12} , C_{13}). Os fios de urdidura são ligados por fios de trama t_1 por tecelagem tridimensional.

10 A faixa 104 compreende também um conjunto de camadas de fios de urdidura, por exemplo, também igual a três (camadas C_{21} , C_{22} , C_{23}), ligadas por fios de trama t_2 por tecelagem tridimensional, como a faixa 102.

Deve ser observado que os fios de trama t_1 não se estendem pelas camadas de fios de urdidura da faixa 104, e que os fios de trama t_2 não se estendem pelas camadas de fios de urdidura da faixa 102, a fim de assegurar um desligamento.

15 No exemplo ilustrado, a tecelagem é uma tecelagem multicamadas realizada com um ligamento do tipo cetim, ou multi-cetim. Outros tipos de tecelagem tridimensional podem ser utilizados, como, por exemplo, uma tecelagem multicamadas com ligamento multi-lona, ou uma tecelagem com ligamento “*interlock*”. Por tecelagem “*interlock*”, quer-se
20 dizer um ligamento de tecelagem no qual cada camada de fios de trama liga várias camadas de fios de urdidura com todos os fios de uma mesma coluna de trama que tenham o mesmo movimento no plano da tecelagem.

25 Outros modos de tecelagem tridimensional são especialmente descritos no documento WO 2006/136755, cujo conteúdo é aqui incorporado por via de referência.

A Fig. 9 é uma vista em corte paralelo à direção de urdidura e trama na região onde a faixa 102 tem a porção de conexão 140c da faixa 104 passando através dela, com os fios de urdidura da porção de conexão

sendo mostrados em corte. Cada camada de fios de urdidura se estende, nessa porção de conexão 140c, em uma direção que faz um ângulo α em relação à direção de trama da faixa 102. A passagem da faixa 104 em cada lado da faixa 102 é realizada, durante a tecelagem, fazendo-se com que todos os fios de urdidura e de trama da faixa 102 atravessem cada fio de urdidura da faixa 104 individualmente.

A Fig. 10 é uma vista em corte de trama na região em que a faixa 102 tem a porção de conexão 150c da faixa 104. No exemplo ilustrado, como indicado acima, a porção de conexão 150c se estende perpendicularmente à direção de urdidura da faixa 102. Todavia, como para a porção de conexão 140c, é possível ter uma porção de conexão 150c que se estenda fazendo um ângulo não nulo em relação à normal à direção de urdidura, segundo a orientação desejada da plataforma externa.

O excesso de espessura 103 pode ser obtido utilizando-se fios de trama de títulos mais grossos e camadas complementares de fios de trama, como mostra, por exemplo, a Fig. 11A.

Na Fig. 11A, o número de camadas de fios de trama passa nesse exemplo de 4 para 7 entre uma porção de esboço fibroso 102₁ da faixa 102, correspondente à perna da pá, e a porção de esboço fibroso 102₃ da faixa 102 que apresenta o excesso de espessura 103.

Além disso, fios de trama t_1 , t'_1 , t''_1 de títulos diferentes são utilizados, sendo os fios, por exemplo, fios de Sic “Nicalon” de título 0,5K (500 filamentos), e os fios t'_1 sendo obtidos pela reunião de dois fios de 0,5K e os fios t''_1 pela reunião de três fios de 0,5K.

A tecelagem na porção de esboço 102₃ necessita de camadas de fios de urdidura em maior número do que a porção 102₁. Isso é vantajosamente obtido durante a transição entre a porção 102₁ e a porção 102₃ diminuindo-se o número de planos de urdidura ao se constituir cada

plano de urdidura na porção 102₃ pela reunião de fios de urdidura de dois planos de urdidura na porção 102₁. As Figs. 11B e 11C mostram dois planos de urdidura vizinhos na porção 102₁, e a Fig. 11D mostra um plano de urdidura obtido na porção 102₃ pela reunião dos planos de urdidura das Figs. 11B e 11C. Nas Figs. 11B, 11C e 11D, para simplificar, os títulos diferentes dos fios de urdidura (como mostra a Fig. 7) ou dos fios de trama (como mostra a Fig. 11A) não são mostrados. Passando das Figs. 11B, 11C para a Fig. 11D, as linhas tracejadas mostram como os fios de urdidura das várias camadas das Figs. 11B e 11C formam as camadas de fios de urdidura na Fig. 11D.

Evidentemente, outras combinações de números de camadas de trama e de títulos de fios de trama podem ser adotadas para formar o excesso de espessura 103.

Em outro modo de realização mostrado esquematicamente na Fig. 12, o excesso de espessura 103 pode ser obtido introduzindo-se um enxerto durante a tecelagem da faixa 102.

Na Fig. 12, o conjunto T₁ de camadas de fios de trama da porção 102₁ da faixa 102 correspondente à perna da pá é dividido por desligamento durante a tecelagem em dois subconjuntos T₁₁, T₁₂ entre os quais um enxerto 103₁ é introduzido. No exemplo ilustrado, a porção 102₁ tem uma espessura maior do que a da porção 102₂ da faixa 102 correspondente à lâmina da pá. A transição entre a porção 102₂ e a porção 102₁ pode ser realizada da mesma maneira descrita acima quanto à transição entre as porções 102₁ e 102₃ da Fig. 11A. A passagem da tira 102 pela tira 104 na região da porção de conexão 104c da Fig. 4 pode opcionalmente ser realizada através da porção 102₁ de maior espessura.

Na extremidade do enxerto 103, oposta à porção 102₁, os subconjuntos T₁₁, T₁₂ de camadas de fios de trama são mais uma vez

reunidos por tecelagem para formar uma porção 102'₁ de mesma espessura que a porção 102₁, e então, por redução de espessura, uma porção 102'₂ de mesma espessura que a porção 102₂, com a porção 102'₂ formando a porção correspondente a uma lâmina de pá para o esboço seguinte tecido.

5 O enxerto 103₁ é preferivelmente de cerâmica monolítica, de preferência do mesmo material cerâmico da matriz do material composto da pá a ser fabricada. Assim, o enxerto 103₁ pode ser um bloco de SiC obtido por sinterização de pó de SiC.

10 Como mostra mais esquematicamente a Fig. 13, vários esboços fibrosos 100 são obtidos por tecelagem de uma faixa 300 na qual são formadas uma ou várias fileiras de esboços fibrosos sucessivos. Zonas de excesso de comprimento 310, 320 são dispostas na direção de urdidura (somente fios de urdidura) e na direção de trama (somente fios de trama) para evitar os fenômenos de borda associados à tecelagem, deixar uma
15 maior liberdade de deformação durante a moldagem da pré-forma e fornecer zonas de transição entre os esboços 100.

A Fig. 14 mostra uma variante de realização segundo a qual uma faixa 400 é fabricada com uma fileira de esboços 100 tecidos na direção de trama perpendicularmente à direção longitudinal da faixa. Zonas
20 de excesso de comprimento 410, 420 são também dispostas na direção de urdidura e na direção de trama. Várias fileiras de esboços 100 podem ser tecidas, sendo a largura da faixa 400 adaptada para este fim.

As etapas sucessivas de um processo de fabricação de uma pá de material composto de acordo com um modo de realização da invenção
25 são indicadas na Fig. 15.

Na etapa 501, uma faixa fibrosa é tecida por tecelagem tridimensional compreendendo uma pluralidade de esboços fibrosos, como, por exemplo, várias fileiras de esboços fibrosos orientados na direção de

urdidura, como mostra a Fig. 13. Para pás de turbomáquinas destinadas a uma utilização em temperaturas elevadas e especialmente em ambientes corrosivos (em particular úmidos), são utilizados para a tecelagem fios formados por fibras de cerâmica, especialmente fibras de carbeto de silício (SiC).

Na etapa 502, a faixa fibrosa é tratada para eliminar a ensimagem presente nas fibras e a presença de óxidos na superfície das fibras. A eliminação de óxido é obtida por tratamento ácido, especialmente por imersão em um banho de ácido fluorídrico. Um tratamento prévio de eliminação de ensimagem é realizado, por exemplo, por decomposição da ensimagem com um breve tratamento térmico.

Na etapa 503, uma camada fina de revestimento interfásico é formada nas fibras da faixa fibrosa por infiltração química em fase gasosa ou CVI (“*Chemical Vapor Infiltration*”). O material do revestimento interfásico é, por exemplo, de carbono pirolítico ou pirocarbono (PyC), de nitreto de boro (BN), ou de carbono dopado com boro (BC com, por exemplo, 5% a 20% de B, o restante sendo C). A camada fina de revestimento interfásico é preferivelmente de pequena espessura, por exemplo, no máximo igual a 100 nm, ou no máximo igual a 50 nm, de maneira a conservar uma boa capacidade de deformação dos esboços fibrosos. De preferência, a espessura é de pelo menos 10 nm.

Na etapa 504, a faixa fibrosa com as fibras revestidas por uma camada fina de revestimento interfásico é impregnada por uma composição de consolidação, normalmente uma resina às vezes diluída em um solvente. Pode-se utilizar uma resina precursora de carbono, por exemplo, uma resina fenólica ou furânica, ou uma resina precursora de cerâmica, por exemplo, uma resina de polissilazano, polissiloxano ou policarbossilano como precursores de SiCN, SiCO e SiC.

Após secagem por eliminação do eventual solvente da resina (etapa 505), uma pré-reticulação da resina pode ser efetuada (etapa 506). A pré-reticulação, ou reticulação incompleta, permite aumentar a rigidez, e portanto a resistência, preservando ao mesmo tempo a capacidade de
5 deformação necessária para a realização de pré-formas de pás.

Na etapa 507, os esboços fibrosos individuais são cortados, como ilustrado na Fig. 3.

Na etapa 508, um esboço fibroso cortado é moldado e colocado em um molde, por exemplo, de grafite, para a conformação da
10 porção de pré-forma de lâmina e raiz e das porções das plataformas interna e externa.

Em seguida, a reticulação da resina é concluída (etapa 509) e a resina reticulada é pirolisada (etapa 510). A reticulação e a pirólise podem ser encadeadas através da elevação progressiva da temperatura no molde.

15 Após a pirólise, obtém-se uma pré-forma fibrosa consolidada pelo resíduo da pirólise. A quantidade de resina de consolidação é escolhida para que o resíduo da pirólise ligue as fibras da pré-forma suficientemente para que esta seja manipulável e conserve sua forma sem o auxílio de ferramentas, devendo ser observado que a quantidade de resina
20 de consolidação escolhida é preferivelmente a menor possível.

As etapas de eliminação de ensimagem, de tratamento ácido e de formação de revestimento interfásico para um substrato de fibras SiC são conhecidas. Pode-se fazer referência ao documento US5071679.

25 Uma segunda camada interfásica é formada por CVI (etapa 511) a fim de se obter globalmente uma interfase fibras-matriz com uma espessura suficiente para assegurar a função de desfragilização do material compósito. A segunda camada interfásica pode ser de um material escolhido dentre PyC, BN, e BC, não necessariamente o mesmo material da

primeira camada interfásica. A espessura da segunda camada interfásica é preferivelmente de pelo menos 100 nm.

A realização de uma interfase em duas camadas, como indicado acima, é preferível. Ela é descrita no pedido de patente francês n^o 5 0854937 da Depositante.

Uma densificação por uma matriz de cerâmica da pré-forma consolidada é em seguida realizada. Pode-se realizar esta densificação por CVI, em cujo caso a formação da segunda camada interfásica e a densificação pela matriz de cerâmica podem ser encadeadas em um mesmo 10 forno.

A densificação pode ser realizada em duas etapas sucessivas (etapas 512 e 514) separadas por uma etapa 513 de usinagem da pá nas dimensões desejadas.

Deve ser observado que uma pré-usinagem pode ser realizada 15 entre as etapas 509 e 510, isto é, após a reticulação e antes da pirólise da resina.

As etapas sucessivas de um processo de fabricação de uma pá de material compósito segundo outro modo de realização da invenção são indicadas na Fig. 16.

20 A etapa 601 de tecelagem tridimensional de uma faixa fibrosa compreendendo uma pluralidade de esboços fibrosos e a etapa 602 de tratamento de eliminação de ensimagem e de óxidos são semelhantes às etapas 501 e 502 do modo de realização da Fig. 15.

Na etapa 603, os esboços fibrosos individuais são cortados na 25 faixa fibrosa, e depois cada esboço fibroso individual é moldado em um molde ou conformador (etapa 604) para se obter uma pré-forma fibrosa de pá por conformação da porção de pré-forma de lâmina e raiz e das porções de pré-forma das plataformas interna e externa.

Na etapa 605, um revestimento interfásico de desfragilização é formado por CVI nas fibras da pré-forma mantida no conformador. O material do revestimento interfásico é, por exemplo, PyC, BN ou BC, como mencionado anteriormente. A espessura do revestimento interfásico se encontra na faixa de 100 até algumas centenas de nanômetros.

Com a pré-forma mantida em sua forma no conformador, uma consolidação da pré-forma por densificação parcial é realizada (etapa 606), sendo a consolidação realizada através da formação de um depósito cerâmico sobre as fibras por CVI.

10 A formação do revestimento interfásico por CVI e a consolidação por depósito cerâmico por CVI podem ser encadeadas em um mesmo forno de CVI.

O conformador é preferivelmente de grafite e apresenta furos que facilitam a passagem da fase gasosa reativa que dá origem ao depósito interfásico e ao depósito cerâmico por CVI.

15 Uma vez que a consolidação seja suficiente para que a pré-forma possa ser manipulada e ao mesmo tempo conservar sua forma sem o auxílio de ferramentas de manutenção, a pré-forma consolidada é extraída do conformador e a densificação por uma matriz cerâmica por CVI é realizada. A densificação pode ser realizada em duas etapas sucessivas (etapas 607 e 609) separadas por uma etapa 608 de usinagem da pá nas dimensões desejadas da peça a ser fabricada.

Na descrição acima, é considerada a fabricação de um perfil de lâmina de espessura variável pela utilização de fios de títulos e/ou contexturas variáveis. É possível, alternativamente, fabricar a porção do esboço fibroso correspondente à porção de pré-forma de lâmina com um certo número de camadas de fios de títulos iguais e textura fixa, sendo a variação de espessura do perfil realizada durante a usinagem após a

primeira etapa de densificação, ou durante uma pré-usinagem da pré-forma de pá consolidada.

Além disso, dependendo das condições de uso visadas para a pá, as fibras do reforço fibroso da pá podem ser de um material que não seja cerâmica, por exemplo, de carbono, e a matriz pode ser de um material que não seja cerâmica, como, por exemplo, carbono ou uma resina, sendo a invenção naturalmente aplicável também à fabricação de pás de materiais compósitos de matriz orgânica.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de fabricação de uma pá de turbina (1) de material compósito que compreende um reforço fibroso densificado por uma matriz, **caracterizado por** compreender:

- a formação por tecelagem tridimensional de um esboço fibroso em peça única (100),

- a moldagem do esboço fibroso para a obtenção de uma pré-forma fibrosa (200) em peça única (100), com uma primeira porção (102) formando uma pré-forma de lâmina (220) e base de pá (230) e ao menos uma segunda porção (104) formando uma pré-forma de plataforma interna ou externa de pá (40, 50), e

- a densificação da pré-forma (200) por uma matriz para a obtenção de uma pá de material compósito (10) com um reforço fibroso constituído pela pré-forma e densificado pela matriz, e formando uma peça única com plataforma interna e/ou externa integradas (240, 250).

2. Processo de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por**, na direção longitudinal do esboço fibroso (100) correspondente à direção longitudinal da pá a ser fabricada, o esboço compreender um primeiro conjunto de uma pluralidade de camadas de fios que são ligados entre si para formar uma primeira porção (102) do esboço correspondente à pré-forma de lâmina e base da pá (220, 230), e um segundo conjunto de uma pluralidade de camadas de fios que são ligados entre si ao menos localmente para formar ao menos uma segunda porção (104) do esboço correspondente a uma pré-forma de plataforma interna ou externa da pá (240, 250); pelos fios do primeiro conjunto de camadas de fios não serem ligados aos fios do segundo conjunto de camadas de fios; e pelo primeiro conjunto de camadas de fios ser atravessado pelos fios do segundo conjunto de camadas de fios em cada segunda porção do esboço.

3. Processo de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo** esboço fibroso (100) ser tecido com um segundo conjunto contínuo de camadas de fios, e pela moldagem do esboço fibroso compreender a eliminação por corte de porções do segundo conjunto de camadas de fios exteriores a cada segunda porção do esboço fibroso.

4. Processo de acordo com a reivindicação 2 ou 3, **caracterizado por**, no local ou ao menos em um dos locais em que o primeiro conjunto de camadas de fios é atravessado pelos fios do segundo conjunto de camadas de fios, a interseção entre uma camada de fios do primeiro conjunto e uma camada de fios do segundo conjunto seguir uma linha não ortogonal à direção longitudinal do esboço fibroso (100).

5. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, **caracterizado por**, na primeira porção (102) do esboço fibroso e em uma direção correspondente à direção que se estende ao longo do perfil de uma lâmina de espessura variável na pá a ser fabricada, o número de camadas de fios no primeiro conjunto de camadas de fios ser constante.

6. Processo de acordo com a reivindicação 5, **caracterizado pelos** fios do primeiro conjunto de camadas de fios serem de pesos variáveis.

7. Processo de acordo com a reivindicação 5 ou 6, **caracterizado pela** textura dos fios do primeiro conjunto de camadas de fios ser variável.

8. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, **caracterizado por** compreender a formação por tecelagem tridimensional de uma faixa que compreenda uma sucessão de esboços fibrosos.

9. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, **caracterizado pelos** esboços (102, 104) serem tecidos com as suas

direções longitudinais correspondentes às direções das pás a serem fabricadas no sentido dos fios de trama.

10. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, **caracterizado pelos** esboços (102, 104) serem tecidos com as suas direções longitudinais correspondentes às direções das pás a serem fabricadas no sentido dos fios de urdidura.

11. Pá de turbina (10) de material compósito que compreende um reforço fibroso obtido por tecelagem tridimensional de fios e densificado por uma matriz, **caracterizada por** compreender uma primeira porção que constitui a lâmina e a base da pá (20, 30) formando uma única pela com ao menos uma segunda porção que constitui uma plataforma interna ou externa da pá (40, 50), e pelas duas porções de reforço fibroso correspondentes à primeira e à segunda porções da pá serem ao menos em parte mutuamente entrelaçadas, com os fios da primeira porção de reforço fibroso penetrando na segunda porção de reforço fibroso.

12. Pá (12) de acordo com a reivindicação 11, **caracterizada por** ser feita de material compósito de matriz de cerâmica.

13. Pá (10) de acordo com as reivindicações 11 e 12, **caracterizada pelos** fios que constituem a porção do reforço fibroso correspondente à segunda porção da pá (40, 50) atravessarem a porção do reforço fibroso correspondente à primeira porção da pá (20, 30).

14. Pá (10) de acordo com qualquer uma das reivindicações 11 a 13, **caracterizada pela** lâmina da pá ter um perfil de espessura variável, ao longo do qual a porção de reforço fibroso correspondente à primeira porção da pá (20, 30) possui um número constante de camadas de fios que se estendem na direção longitudinal da pá e com um peso e/ou uma textura variáveis.

15. Pá (10) de acordo com qualquer uma das reivindicações 11 a 13, **caracterizada pela** lâmina da pá ter um perfil de espessura variável, ao longo do qual a porção de reforço fibroso correspondente à primeira porção da pá (20, 30) possui um número variável de camadas de fios que se estendem na direção longitudinal da pá.

16. Turbina **caracterizada por** ser equipada com uma pá (10) como definida em qualquer uma das reivindicações 11 a 15 ou fabricada de acordo com o processo como definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 10.

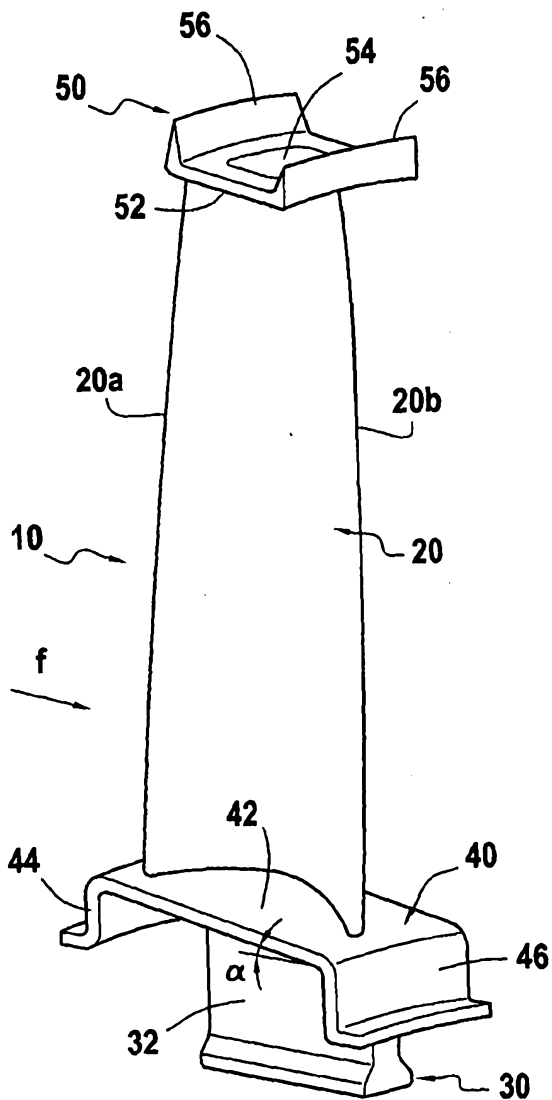


FIG. 1

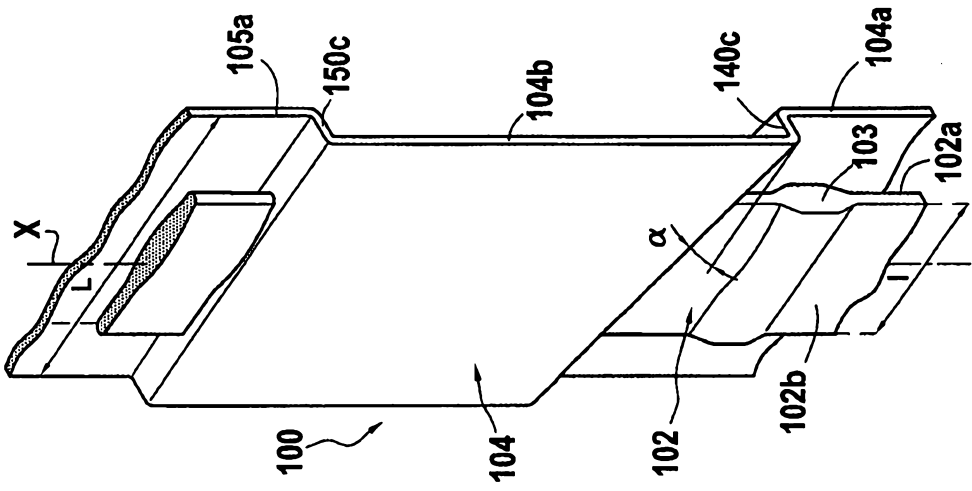


FIG. 2

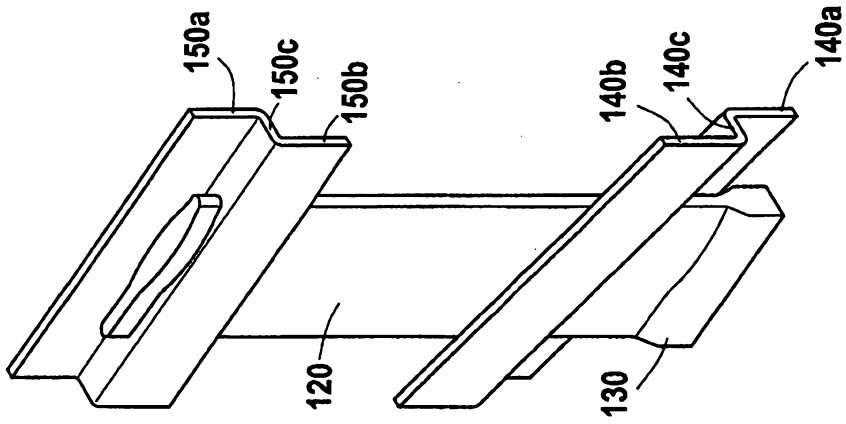


FIG. 3

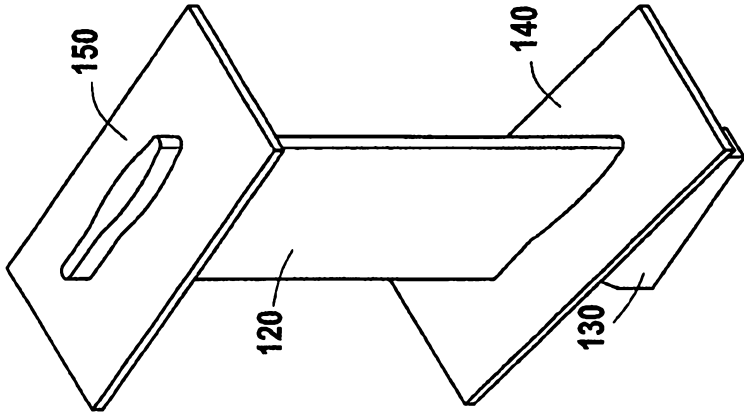


FIG. 4

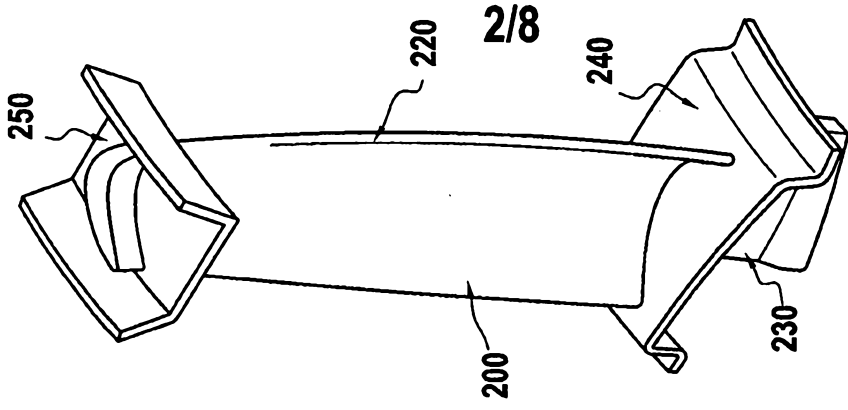


FIG. 5

FIG. 6



FIG. 7

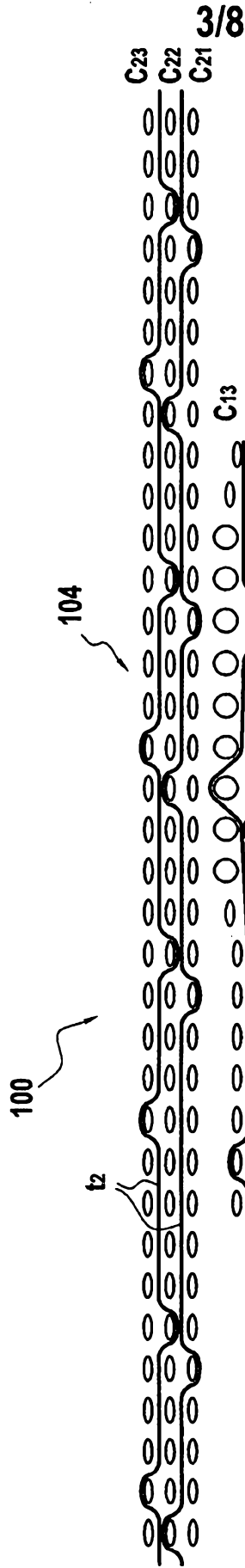
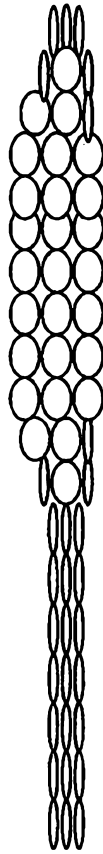


FIG. 8A

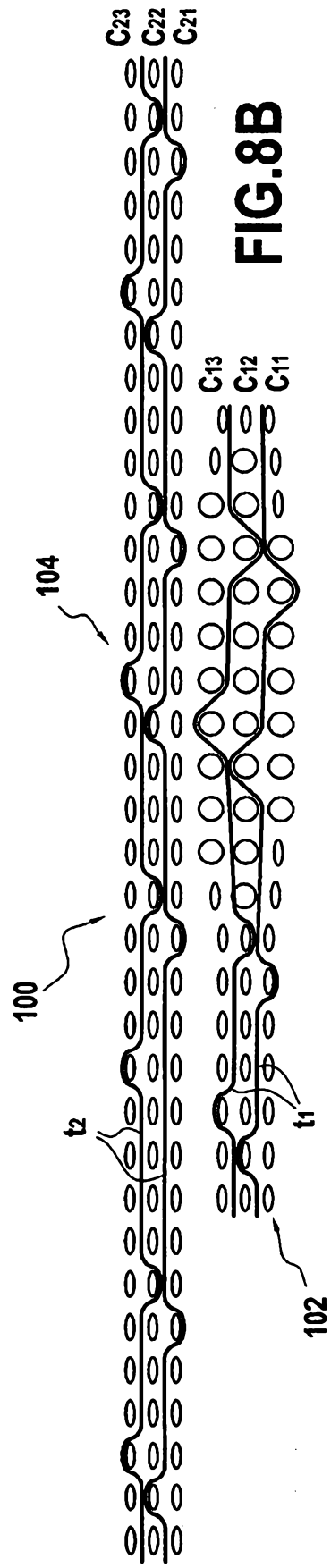


FIG. 8B

FIG.9

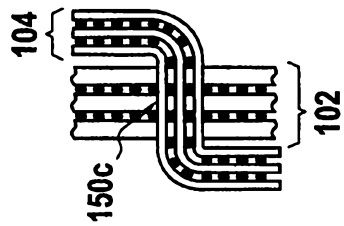
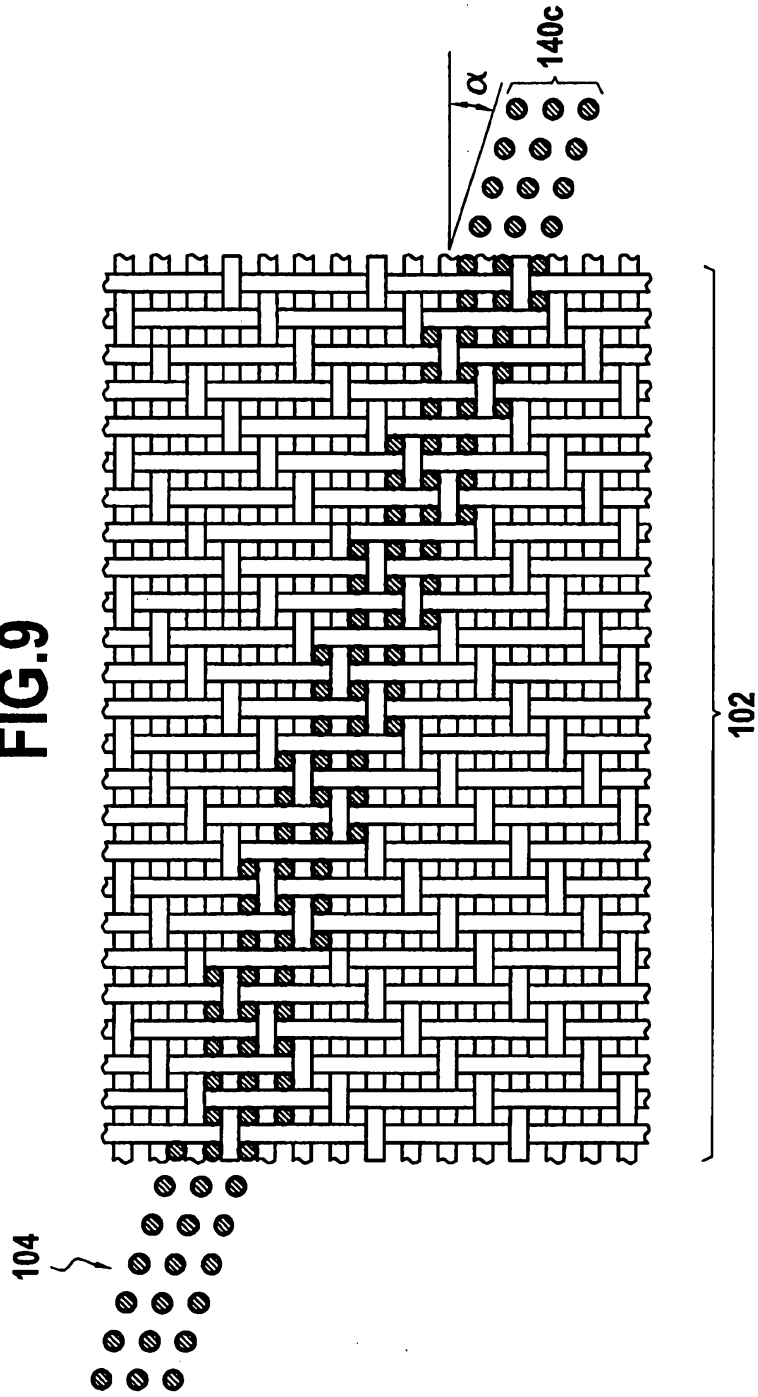


FIG.10

5/8

FIG.11A

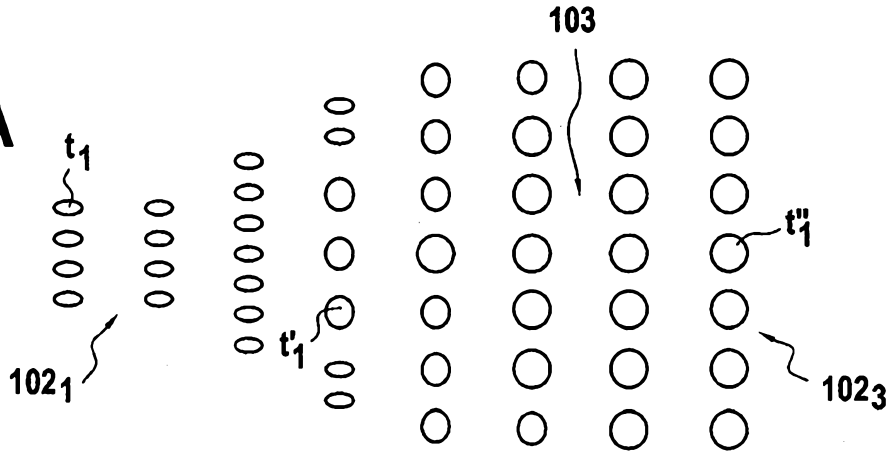


FIG.11B



FIG.11C



FIG.11D

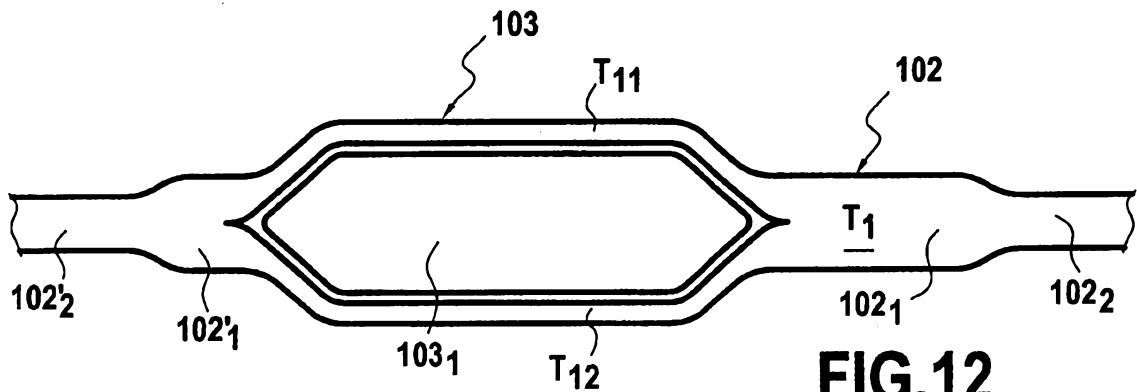


FIG.12

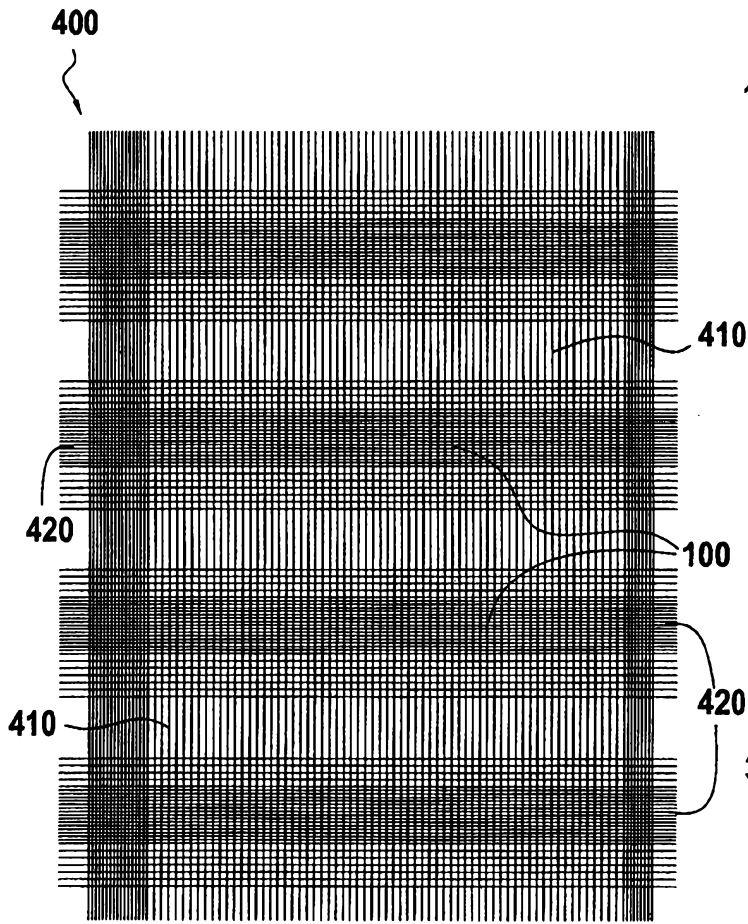


FIG. 14

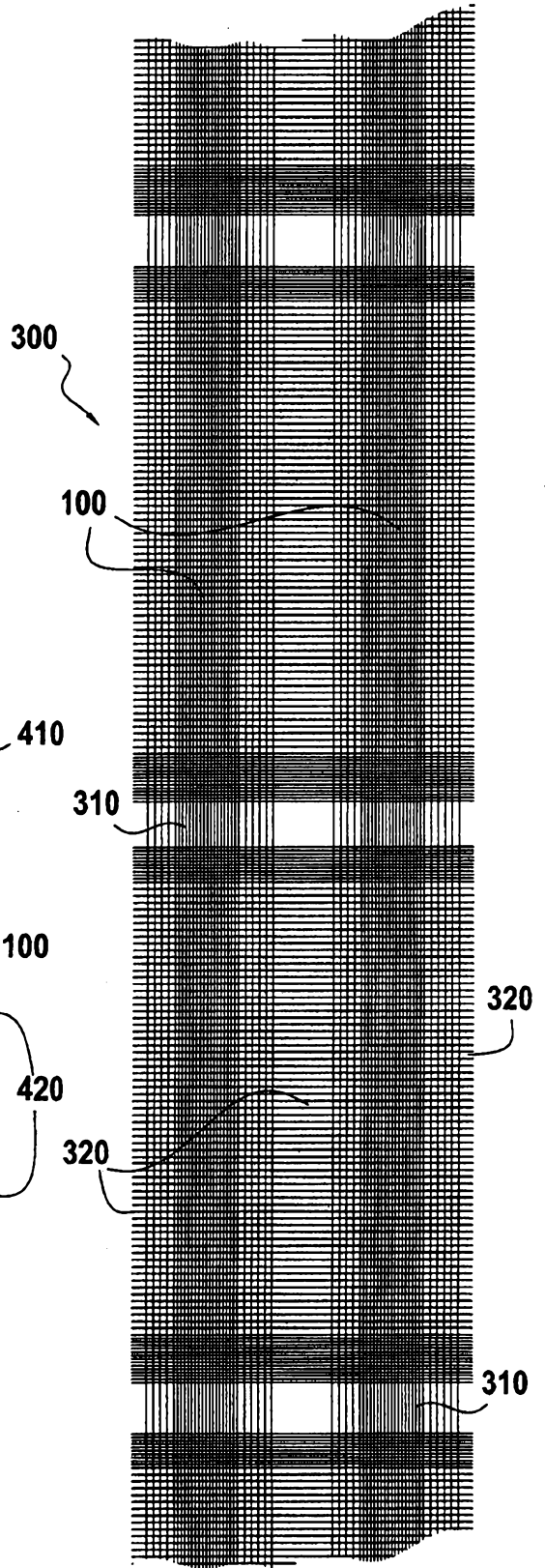


FIG. 13

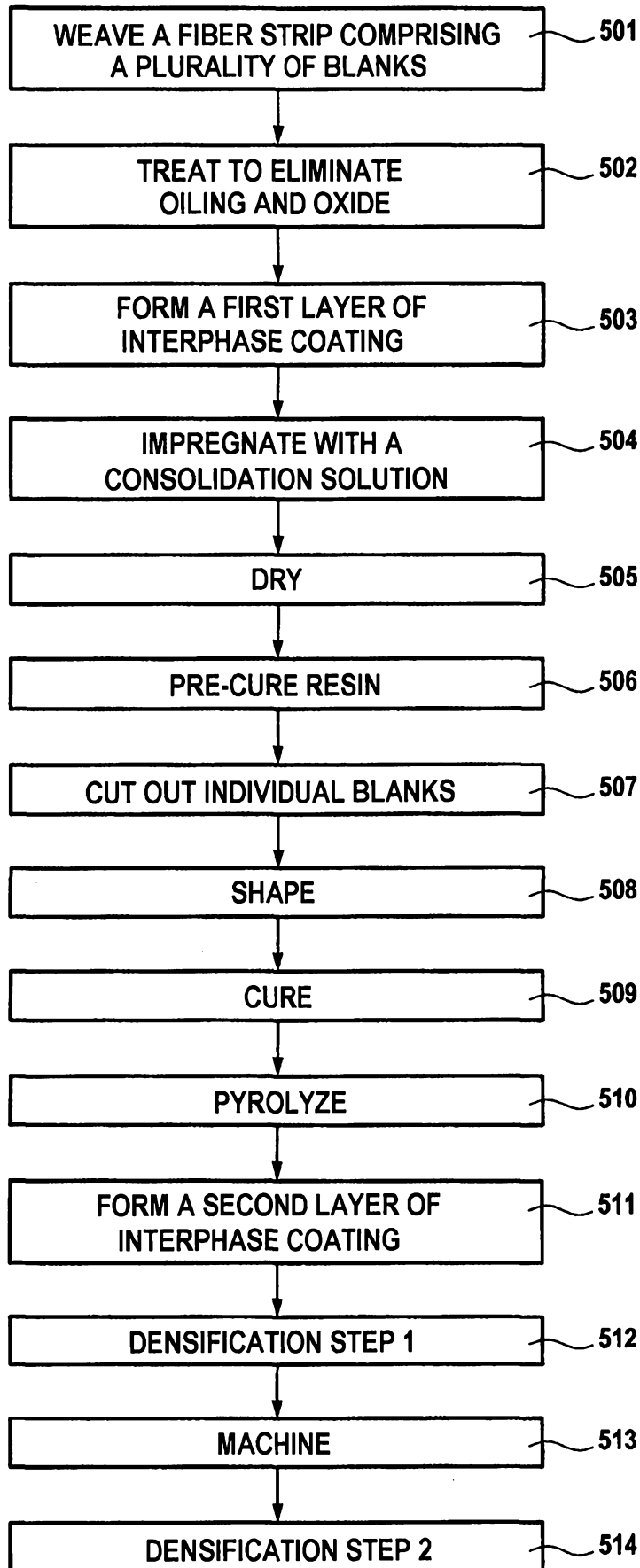


FIG.15

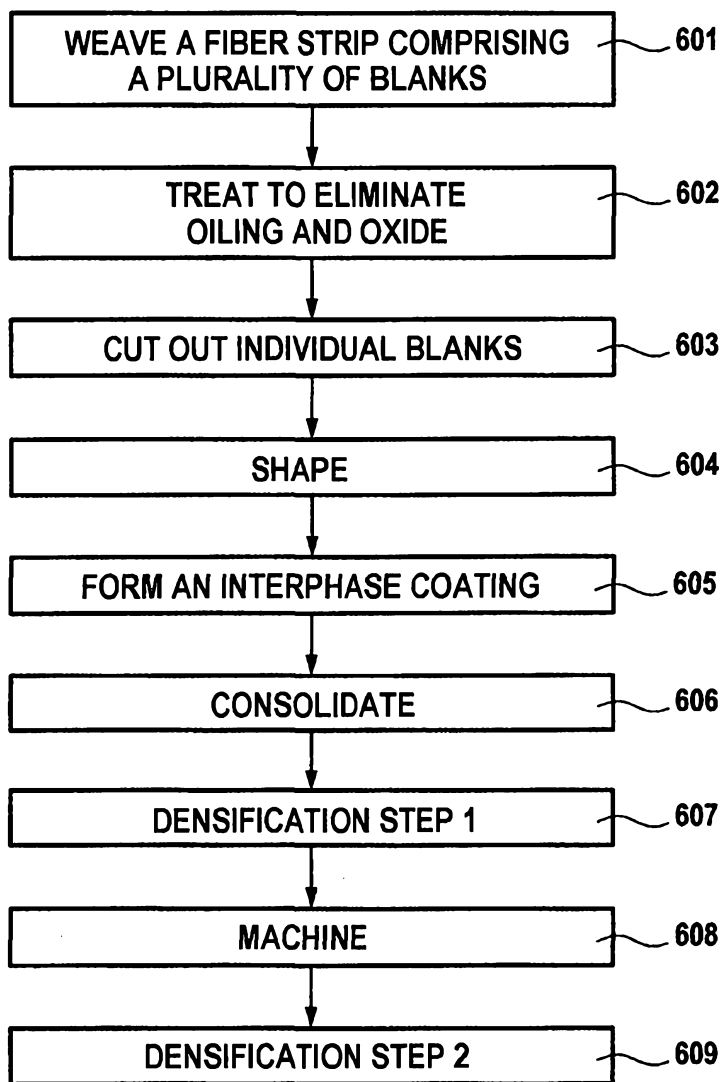


FIG.16