



República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) PI 1005765-0 A2

(22) Data do Depósito: 03/12/2010

(43) Data da Publicação: 20/10/2015

(RPI 2337)



(54) Título: MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO DE SUPERLIGA

(51) Int. Cl.: B23K 26/40; B23K 26/00; F01D 5/00

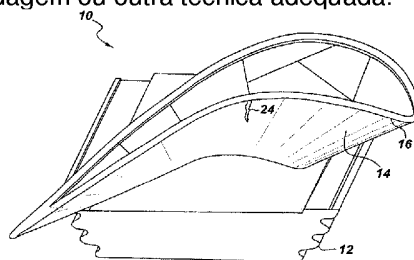
(30) Prioridade Unionista: 23/12/2009 US 12/645,501

(73) Titular(es): GENERAL ELECTRIC COMPANY

(72) Inventor(es): HUAN QI, BHUPENDRA KUMAR GUPTA, MARSHALL GORDON JONES

(74) Procurador(es): ARTUR FRANCISCO SCHAAL

(57) Resumo: MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO DE SUPERLIGA. Trata-se de um método descrito para o tratamento de um substrato de superliga (32) que inclui pelo menos uma cavidade (33) contendo material óxido de metal aderente sobre sua superfície (31). Um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto (46) é direcionado contra a superfície da cavidade por um período de tempo suficiente para remover substancialmente todo o material óxido de metal aderente. O feixe de laser (46) é caracterizado por uma densidade de potência de pico situada na faixa de cerca de 10 megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>. Em outra modalidade, um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto de alta potência é direcionado para uma região (62) sobre o substrato (64) que inclui a cavidade (60), sob as condições operacionais de laser que são capazes de cortar o material de superliga; de modo que uma região de contorno (66) seja formada dentro do substrato e que inclua a cavidade. A cavidade pode ser uma fenda em uma pá de turbina e a fenda (60) pode ser reparada após o tratamento através de soldagem ou outra técnica adequada.



## **“MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO DE SUPERLIGA”**

### **ANTECEDENTE DA INVENÇÃO**

Esta invenção refere-se geralmente a metais e ligas de metal usadas em aplicações de alta temperatura. Em algumas modalidades  
5 específicas, essa se refere a métodos para tratamento de componentes de superliga para prepará-las para processos de reparo adicionais.

As superligas são frequentemente os materiais escolhidos para componentes destinados a ambientes de alta temperatura. Como um exemplo, pás de turbina e outras partes dos motores da turbina (por exemplo, motores  
10 de turbina a gás) são muitas vezes formadas por superligas com base de níquel devido ao fato de que precisam manter sua integridade em temperaturas de pelo menos cerca de 1000°C a 1150°C. Os revestimentos protetores, frequentemente referidos como revestimentos de barreira térmica ou "TBC"s, aumentam efetivamente a temperatura de operação dos  
15 componentes da turbina através da manutenção ou redução da temperatura da superfície das ligas usadas para formar os vários componentes do motor.

É comum que os componentes do motor de turbina a gás desenvolvam fendas ao longo do curso de sua operação. Em muitos casos, as fendas se originam sobre a superfície do componente e se estendem para o  
20 interior do componente. Essas fendas primeiramente surgem ao longo do tempo, a partir de pressões e temperaturas extremas experimentadas pelos motores de turbina. Uma preocupação em particular são as fendas que se formam nas pás do motor de turbina, por exemplo, as pás de turbina de alta pressão (HPT) mais próximas à câmara de combustão do motor. Essas pás  
25 são submetidas aos gases de combustão mais quentes dos quais a energia é extraída e são, na maioria, geralmente formadas pelas superligas de níquel (Ni). (Essas ligas especializadas tendem a produzir estruturas de liga de cristal único solidificado direcionalmente e equiaxial).

A figura 1 ilustra uma pá de turbina exemplificativa 10, para uso em turbinas de geração de potência, por exemplo, a primeira fileira de pás de uma turbina de combustão ou a gás. A pá de turbina 10 inclui uma raiz da pá 12, uma porção de aerofólio 14 e uma porção de ponta 16. A raiz da pá 12 é projetada para ser inserida e mantida por um disco sobre um eixo de rotação (não mostrado) da turbina. A porção de aerofólio 14 é conformada para extrair energia dos gases de combustão que passam pela porção de aerofólio 14, deste modo conferindo uma energia mecânica de rotação para o eixo da turbina. Para os modernos motores de turbina a gás, a porção de aerofólio 14 é projetada para incluir uma ou mais passagens de resfriamento formadas abaixo da superfície do aerofólio a fim de que a passagem de ar de resfriamento necessário garanta a integridade do material da pá no ambiente de gás de combustão quente.

A figura 1 fornece uma ilustração de uma das fendas 24 que pode se desenvolver próximo à ponta 16 da pá 10. Conforme aludido previamente, as fendas podem se desenvolver devido às tensões de fadiga de baixo ciclo conferidas na ponta da pá 16 durante a operação da turbina. Se a fenda 24 se estender além de uma dimensão crítica, a pá de turbina 10 deverá ser removida do serviço e/ou reparada, a fim de evitar a insuficiência da pá e da turbina.

Em muitos casos, a fenda pode ser reparada através da remoção do material adjacente à fenda 24, para formar um volume de reparo da fenda e, então, carregar o volume de reparo da fenda com metal soldado. Em geral, várias técnicas são usadas para o reparo de fendas. Inúmeros exemplos proeminentes incluem soldagem, brasagem por difusão, autocaldeação por difusão ativada (ADH) e técnicas de aspersão térmica, como oxi-combustível de alta velocidade (HVOF).

Para a maior parte dessas técnicas, a preparação inicial da

superfície de reparo é crítica. A presença indesejável de óxidos quimicamente estáveis, assim como qualquer cobertura de ligação metálica ou material de revestimento de barreira térmica cerâmica, pode impedir enormemente a soldagem ou brasagem de uma superfície de reparo. Assim, esses materiais  
5 devem ser completamente removidos, para permitir o tratamento, por exemplo, para permitir a revisão bem sucedida da turbina.

Vários métodos foram usados anteriormente para limpar as superfícies de reparo de componentes de metal como pás de turbina. Em alguns casos, a retificação manual é executada antes do reparo através das  
10 técnicas de soldagem. Apesar de as técnicas de retificação serem úteis em muitas situações, essas também consomem muito tempo. Além disso, a efetividade da retificação é muito dependente do desempenho do operador. Adicionalmente, no caso de fendas dentro das superfícies de aerofólio da turbina, os procedimentos de retificação são muitas vezes limitados para uma  
15 profundidade de fenda de cerca de 0,35 polegadas (8,9 mm). Assim, fendas profundas em componentes como pás HPT não podem ser sempre “preparadas” de maneira satisfatória e tenta-se executar o processo de preparação que, algumas vezes, resulta em uma “queda de solda”.

Várias técnicas de limpeza com íon fluoreto (FIC) são usadas  
20 para limpar fendas e outras superfícies de cavidade. (Algumas das técnicas relatadas são referidas como o “Processo Dayton”). Os processos FIC usualmente dependem da decomposição térmica de um polímero com base de flúor como politetrafluoroetileno (PTFE). De acordo com alguns mecanismos, os monômeros de fluoreto de carbono resultantes combinam com hidrogênio e  
25 esses produtos entram em contato com vários depósitos de óxido, convertendo os depósitos para compostos de fluoreto. Os compostos de fluoreto são voláteis e deixam a área de cavidade em um fluxo de gás. As etapas de aquecimento são frequentemente usadas para transformar quaisquer

depósitos de superfície restantes e difundí-los para produtos voláteis que podem ser removidos em forma de gás.

Apesar de a limpeza com íon fluoreto e processos de entalhe serem efetivos em algumas situações, esses também podem exibir  
5 desvantagens significativas. Como um exemplo, essas técnicas podem exigir períodos de processo relativamente longos se a superfície da peça de trabalho tiver que ser completamente limpa. Estas também exigem altas temperaturas de limpeza, por exemplo, cerca de 1900°F (1038°C). Além disso, os processos FIC muitas vezes dependem do uso de compostos como fluoreto de  
10 hidrogênio. Esses materiais são corrosivos e tóxicos e exigem um manuseio especial e procedimentos de descarte. Alguns dos compostos também são classificados como poluentes de ar perigosos. Adicionalmente, os processos FIC podem atacar os materiais que formam os revestimentos protetores nos artigos de superliga, por exemplo, materiais de alumineto de níquel ou  
15 alumineto de platina. Assim, deve-se tomar cuidado ao encobrir ou, de outra forma, proteger as áreas do substrato em que esses revestimentos protetores devem permanecer, por exemplo, áreas afastadas da região de reparo específica.

Em conformidade, novas técnicas para a limpeza de cavidades  
20 e de outras regiões nos substratos de superliga seriam bem recebidas na técnica. As técnicas deveriam ser efetivas na remoção de óxidos e de outros contaminantes da região de cavidade, assim como a remoção de quaisquer materiais de revestimento protetor, na preparação para os processos de reparo. Além disso, as técnicas deveriam ser capazes de  
25 serem executadas em um período de tempo relativamente curto e à temperatura ambiente. Elas também deveriam minimizar ou eliminar a necessidade de produtos químicos os quais são perigosos e exigem procedimentos de segurança especiais.

### **BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO**

Uma modalidade da presente invenção é direcionada a um método para tratar um substrato de superliga que inclui pelo menos uma cavidade (como uma fenda) contendo material óxido de metal aderente sobre sua superfície. O método compreende a etapa de direcionar um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto contra a superfície da cavidade durante período de tempo suficiente para remover substancialmente todo o material óxido de metal aderente, sendo que o feixe de laser é caracterizado por uma densidade de potência de pico na faixa de cerca de 10 megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>.

Outra modalidade refere-se a um método para tratar um substrato de superliga que inclui pelo menos uma cavidade. Essa modalidade compreende a etapa de direcionar um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto e de alta potência (potência média) contra uma região no substrato que inclui a cavidade, sob as condições operacionais do laser que são capazes de reduzir o material de superliga; de modo que a região de contorno possa ser formada dentro do substrato, que contém a cavidade.

### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

A figura 1 é uma vista em perspectiva de uma pá de motor de turbina, incluindo a raiz de malhete, porção de aerofólio e porção de ponta.

A figura 2 é um esquema de um aparelho de laser para o tratamento de um componente de acordo com algumas modalidades dessa invenção.

A figura 3 é uma ilustração de uma fenda em uma pá de turbina e de uma região de contorno que circunda a mesma.

### **DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO**

As inúmeras faixas de processo e composicionais aqui reveladas são abrangentes e combináveis (por exemplo, faixas de "até cerca de 25 % em

peso” ou, mais especificamente, “cerca de 5 % a cerca de 20 % em peso”, abrangem os pontos de extremidade e todos os valores intermediários das faixas). Além disso, o termo “combinação” abrange combinações, misturas, ligas, produtos de reação e similares. Adicionalmente, os termos “primeiro,”  
5 “segundo,” e similares, no presente documento não denotam qualquer ordem, quantidade ou importância, mas, de preferência, são usados para distinguir um elemento de outro. Os termos “um” e “uma” no presente documento não denotam uma limitação de quantidade, mas, de preferência, denotam a presença de pelo menos um dos itens referenciados. O modificador “cerca de”  
10 usado em conexão com uma quantidade abrange o valor estimado e tem o significado ditado pelo contexto, (por exemplo, inclui o grau de erro associado à medida da quantidade-particular). O sufixo “(s)” conforme usado no presente documento tem a intenção de incluir tanto o singular quanto o plural do termo que ele modifica, por meio disso incluindo um ou mais daquele termo (por  
15 exemplo, “o composto” pode incluir um ou mais compostos, exceto onde especificado em contrário). A referência para todo o relatório descritivo de “uma (numeral) modalidade”, “outra modalidade”, “uma (artigo) modalidade”, e por aí em diante, significa que um elemento em particular (por exemplo, atributo, estrutura e/ou característica) descrito em conexão com a modalidade  
20 é incluído em pelo menos uma (numeral) modalidade aqui descrita e que pode ou não estar presente em outras modalidades. Em adição, deve ser compreendido que os atributos inventivos descritos devem ser combinados em qualquer maneira adequada nas várias modalidades.

Conforme mencionado previamente, o substrato a ser tratado é  
25 pelo menos parcialmente formado a partir de um material de superliga. Esses materiais são bem conhecidos na técnica, para o uso em conjuntos de turbina a gás e outros componentes de alta temperatura. Em geral, o termo “superliga” é usualmente intencionado para abranger ligas com base de ferro, cobalto ou

níquel, que incluem um ou mais outros elementos, incluindo esses exemplos não limitadores como alumínio, tungstênio, molibdênio, titânio, e ferro. As superligas exibem propriedades físicas e químicas desejáveis sob condições de alta temperatura, alta tensão e de alta pressão geralmente encontradas durante a operação da turbina (por exemplo, até cerca de 1.150°C).

Os componentes com base de superliga são muitas vezes dotados de revestimentos protetores importantes. Os exemplos incluem revestimentos de barreira térmica (TBCs). A maior parte dos TBCs é com base de cerâmica, como um material como zircônio estabilizado com ítria. Usualmente, as cerâmicas de TBC são aplicadas em uma camada intermediária que é aplicada diretamente à superfície da parte de metal. A camada intermediária é muitas vezes uma camada de ligação. As camadas de ligação são tipicamente formadas de um material como "MCrAlX", em que "M" representa um metal como ferro, níquel, cobalto ou combinações dos mesmos; e "X" é um elemento selecionado de um grupo que consiste em Y, Ta, Si, Hf, Ti, Zr, B, C e combinações dos mesmos.

Em muitos casos, os revestimentos protetores e quaisquer subprodutos formados quando os revestimentos são expostos às várias condições ambiente, precisam ser removidos antes de o componente ser reparado, por exemplo, através da soldagem. Alguns dos exemplos específicos de materiais que necessitam ser removidos incluem óxidos, como óxido de alumínio, óxido de zircônio, óxido de níquel, óxido de cromo, óxido de molibdênio e óxido de silício-alumínio-magnésio-cálcio (CMAS). (Deve ser compreendido que termos como "óxido de níquel" e "óxido de cromo" têm a intenção de incluir um ou múltiplos compostos de óxido, por exemplo, óxido de cromo (II), óxido de cromo (III) ou dióxido de cromo).

Conforme descrito anteriormente, o substrato inclui pelo menos uma cavidade. Conforme aqui usado, o termo "cavidade" tem a intenção de se



referir a qualquer tipo de orifício, depressão, endentação, canal ou racha. O termo também se refere a vários defeitos ou irregularidades sobre a superfície do substrato, por exemplo, áreas ásperas ou áreas esburacadas. No caso de componentes de turbina como pás de turbina, a cavidade ou “defeito” é, em geral, uma fenda, como aquela descrita na figura 1. O tamanho da fenda que é capaz de ser reparada pode variar significativamente, por exemplo, de cerca de 25 micra em profundidade a cerca de 10 mm em profundidade; e de cerca de 5 micra em largura a cerca de 4 mm em largura (conforma medido na direção radial, por exemplo, através da espessura da parede de uma pá de turbina). (A espessura da parede de uma pá HPT típica pode se situar na faixa de cerca de 0,5 mm a cerca de 2 mm).

Conforme mencionado acima, um laser é usado para tratar a superfície da cavidade para remover substancialmente todo o material óxido aderente, de acordo com as modalidades dessa invenção. Uma variedade de tipos de lasers pode ser usada para esse processo. Os exemplos não limitadores incluem lasers de estado sólido (por exemplo, lasers de diodo), lasers de fibra e lasers de excimer. (Os lasers de fibra podem algumas vezes ser considerados como sendo um tipo de laser de estado sólido). Aqueles elementos versados na técnica estão familiarizados com a operação de cada um desses tipos de lasers. Os lasers de estado sólido com pulsos relativamente curtos são frequentemente preferenciais. Os exemplos específicos incluem lasers de 1 micron ou lasers verdes (0,532 micron), embora o comprimento de onda possa variar de infravermelho próximo para ultravioleta. As técnicas para o ajuste do comprimento de onda do laser também são conhecidas na técnica, por exemplo, com o uso de “duplicadores de frequência” ou cristais de duplicação.

Em modalidades preferenciais, o laser deve ser capaz de fornecer um feixe de alta taxa de repetição de pulso curto contra a superfície

da cavidade. O comprimento do pulso é usualmente na faixa de cerca de 1 nanossegundo a cerca de 1 microssegundo. Entretanto, os lasers nas faixas de pulso de femtossegundo e picossegundo podem, algumas vezes, ser usados. (Aqueles elementos versados na técnica compreendem que um  
5 decréscimo no comprimento de pulso, aproximadamente no mesmo nível de energia, tipicamente resulta em um valor de potência de laser mais elevado). Em geral, o uso dos comprimentos de pulso mais curto resulta em um menor derretimento e evaporação do material da superfície do substrato e, frequentemente, em uma superfície tratada mais lisa. Entretanto, em alguns  
10 casos, o comprimento do pulso curto pode reduzir o processo de limpeza em sua totalidade. Em algumas modalidade preferenciais, ao tratar as fendas nas pontas da-pá de turbina, o comprimento do pulso é muitas vezes situado na faixa de cerca de 1 nanossegundo a cerca de 20 nanossegundos.

A taxa de repetição do feixe de laser (isto é, o número de pulsos  
15 emitidos por segundo) pode ser ajustada como uma função da potência média para um dispositivo de laser em particular. Em geral, a taxa de repetição é de pelo menos cerca de 100 Hz e, frequentemente, na faixa de cerca de 1 kHz a cerca de 500 kHz. Na situação em que uma grande quantidade de material (por exemplo, material óxido) tem que ser removida da área da cavidade ou  
20 quando o material adere persistentemente à superfície da cavidade, a taxa de repetição é, algumas vezes, selecionada para variar o valor da energia por pulso. Aqueles elementos versados na técnica serão capazes de selecionar a taxa de repetição ou a potência de laser de pico/média mais apropriada, baseados em vários fatores, como o tipo de sistema de laser empregado; a  
25 energia de pulso do laser; o material a ser removido do substrato; e as dimensões como um todo da cavidade.

Conforme mencionado acima, o feixe de laser é caracterizado por uma densidade de potência de pico que é usualmente na faixa de cerca de 10

megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>. Em algumas modalidades específicas, a densidade de potência de pico está na faixa de cerca de 100 megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>. O valor de potência média, nesse caso, é usualmente na faixa de cerca de 1 watt a cerca de 15 watts. Muitos dos

5 fatores mencionados anteriormente também serão importantes aqui, por exemplo, o tipo e a quantidade do material a ser removido da área da cavidade; a profundidade da cavidade; e o tipo de sistema de laser empregado. Aqueles elementos versados na técnica serão capazes de selecionar a densidade de potência mais apropriada para uma dada situação.

10 Conforme mencionado previamente, o feixe de laser é direcionado contra a superfície da cavidade do substrato por um período de tempo suficiente para remover substancialmente todo o material óxido de metal aderente. O tempo exigido para realizar esse objetivo dependerá dos vários parâmetros operacionais de laser mencionados acima, assim como o tipo e

15 profundidade do material a ser removido da cavidade. Uma ilustração não limitadora pode ser fornecida no caso de uma pá de turbina com base de níquel ter uma fenda com o formato em V em sua ponta, com a profundidade da fenda de cerca de 1 mm (através da espessura da parede de um substrato), e uma largura da fenda na faixa de cerca de 0,5 mm a cerca de 4 mm. Nessa

20 ilustração, é suposto que a superfície da fenda seja recoberta com uma camada de material óxido de metal que tem uma profundidade de cerca de 0,3 mm. Nesse caso, para um laser verde de Nd:YAG de estado sólido que produz uma densidade de potência de cerca de 8 gigawatts/cm<sup>2</sup>; um comprimento de pulso de cerca de 10 nanossegundos; e uma taxa de repetição de cerca de 10

25 kHz, o tempo exigido para remoção de substancialmente todo o material óxido de metal se situa usualmente na faixa de cerca de 30 segundos a cerca de 600 segundos.

Em muitas modalidades preferenciais, o feixe de laser usado para

as modalidades dessa invenção é focalizado sobre a superfície da cavidade através de um módulo de varredura. Os módulos de varredura são conhecidos na técnica e descritos, por exemplo, nas patentes U.S.7.528.342 (Deshi) e 7.529.010 (Scaggs et al), ambas incorporadas no presente documento a título de referência. Em geral, os "scaners" podem ser descritos como dispositivos eletromagnéticos que movem espelhos em padrões pré-selecionados (usualmente controlados por microprocessadores), de modo que reflitam o feixe de laser e o direcionem para um ponto desejado sobre um substrato. Uma variedade de módulos de varredura pode ser usada. Os exemplos não limitadores incluem scaners galvo (algumas vezes referidos como "galvanômetros" ou "galvos") e scaners piezo. Aqueles elementos versados na técnica estão familiarizados com a operação desses scaners e com sua incorporação em um sistema de varredura a laser.

A figura 2 é um esquema ilustrativo de um aparelho de laser adequado 30 para as modalidades dessa invenção. A peça de trabalho 32, por exemplo, uma pá HPT, é seguramente fixada em um dispositivo de aperto ou em um limitador similar 34. O limitador 34 é um anexo da plataforma do suporte de laser 36. A plataforma 36 tipicamente inclui um estágio de cinco eixos geométricos ou uma mesa 38, e todos os detalhes dessa mesa devem ser aqui descritos. O estágio de cinco eixos geométricos é capaz de montar a peça de trabalho 32 para uma translação de precisão de três eixos geométricos (X,Y,Z) e uma rotação de precisão (em duas direções, por exemplo, "A" e "B") relacionada a isso. (Deve ser notado que a peça de trabalho é exagerada no tamanho, para facilitar a visualização; e a posição e o tamanho relativos dos outros componentes nessa figura podem variar consideravelmente).

Essa plataforma do suporte de laser pode vantajosamente ser parte de uma máquina complexa numericamente controlada por computador

de eixos geométricos múltiplos (CNC). Essas máquinas são conhecidas na técnica e estão comercialmente disponíveis. O uso de tal máquina para manipular um substrato é descrito na patente U.S.7.351.290 de S. Rutkowski et al, que é incorporada no presente documento a título de referência.

5 Conforme descrito na patente de Rutkowski, o uso de tal máquina permite o movimento do substrato ao longo de um ou mais eixos geométricos rotacionais relativos aos eixos geométricos lineares X e Y. As máquinas CNC desse tipo estão comercialmente disponíveis junto a várias companhias, como Haas Automation, Inc., Oxnard, Calif., EUA. Aqueles elementos versados na técnica  
10 podem adaptar essa máquina para o uso na presente invenção, sem esforço indevido. Além disso, robôs industriais podem ser usados para coordenar o movimento do laser e da plataforma de suporte.

Com referência continuada ao aparelho ilustrativo da figura 2, a máquina básica é tipicamente dotada de um controlador de cinco eixos  
15 geométricos (não mostrado). A plataforma 38 pode ainda incluir um elevador convencional 40, no qual um fuso rotatório convencional pode ser montado. O elevador 40 introduz um eixo geométrico vertical (Z) de translação, relativo à mesa 38. Além disso, outro fuso ou dispositivo de rotação similar (não mostrado) pode ser montado sobre o elevador 40 para fornecer um segundo  
20 eixo geométrico rotatório, conforme descrito na patente de Rutkowski.

Adicionalmente, o aparelho de laser total 30 da figura 2 também pode incluir pelo menos um controlador ou computador digitalmente programável convencional 42. O computador 42 pode fornecer várias funções relativas ao laser e unidades de varredura, mas também pode ser configurado,  
25 com software apropriado, para controlar todos os eixos geométricos de movimento da plataforma de suporte 36. Nessa maneira, a coordenação de cinco eixos geométricos entre o aparelho de laser e a peça de trabalho pode ser alcançada. Essa capacidade por sua vez resulta em varredura, limpeza

e/ou corte preciso de uma porção desejada da peça de trabalho, conforme adicionalmente descrito no presente documento.

A fonte de laser 44 emite o feixe de laser desejado 46, que é geralmente colimado e de um estado de polarização linear ou circular. Em  
5 alguns casos, o feixe de laser incide substancial e normalmente sobre uma placa de onda (não mostrada), a fim de trocar o estado de polarização do feixe. Além disso, o feixe de laser (isto é, o pulso de laser) pode ser modulado através de um meio de modulação de feixe adequado (também não mostrado). Em algumas modalidades, uma ou mais lentes ópticas podem ser usadas para  
10 expandir ou reduzir o diâmetro do feixe.

O feixe de laser 46 é, então, varrido por um módulo de varredura 48, conforme descrito previamente. O módulo de varredura varre o feixe sobre a superfície pré-selecionada 31 da peça de trabalho 32. (A fenda 33, dentro da superfície 31, é descrita em uma forma simples). Além disso, a câmera 50, por  
15 exemplo, uma câmera CCD, exibe imagens da peça de trabalho (geralmente através de um polarizador, não mostrado aqui), para auxiliar no alinhamento da peça de trabalho em relação ao feixe de laser, e para monitorar o processo de limpeza e/ou corte. Durante o tratamento, a peça de trabalho 32 é usualmente vedada dentro de um compartimento fechado de blindagem 52, que é  
20 carregado com gases semi-inertes ou inertes (ou gases de formação como hidrogênio ou misturas contendo hidrogênio), originados na fonte de gás 53. Esse compartimento fechado é comumente empregado na indústria de soldagem. Além disso, mostrado em uma forma simplista, o computador 42 se comunica, através de mecanismos conhecidos, com a unidade de laser,  
25 scanner, câmera e com a plataforma CNC, via condutos 54, 56, 58, e 59, respectivamente.

Vários outros detalhes e dispositivos opcionais podem ser usados com o sistema de laser como aquele descrito acima, ou com outros sistemas.

de laser que podem ser usados para essa invenção. Alguns desses detalhes são apresentados nas patentes de Deshi e Scaggs et al, mencionadas acima, e nas patentes U.S.5.419.971 (Skelly et al); 6.491.207 (Smashey et al); e 6.759.627 (Kilburn); assim como nos documentos WO 2007/096480 A1 e EP 1.247.003 B1, sendo que todos estes também estão incorporados no presente documento a título de referência. Informações adicionais podem ser encontradas em "Laser Beam Machining (LBM), State of the Art and New Opportunities", J. Meijer, Journal of Materials Processing Technology 149 (2004), pp. 2 a 17; e em "Modelling and Diagnostic of Pulsed Laser Cleaning of Oxidized Metallic Surfaces, R. Oltra et al, Applied Surface Science 96 a 98 (1996), pp. 484 a 490.

O processo descrito no presente documento é diferente dos processos de choque de onda gerado por laser, que são empregados na técnica. Esses processos são algumas vezes usados para remover fragmentos como crosta dos componentes da turbina. Em contraste, o processo de limpeza descrito no presente documento é considerado por ser um processo de ablação de laser, no qual a potência relativamente alta do laser pode frequentemente resultar em uma vaporização direta dos contaminantes/materiais sólidos da superfície do substrato.

Em algumas modalidades dessa invenção, a cavidade (por exemplo, uma fenda ou outro defeito) é reparada através do preenchimento da mesma com um material de reposição. O material de preenchimento pode ser similar ou idêntico na composição ao material original de formação do substrato, modificado para o processamento. Entretanto, outros materiais também podem ser usados para preencher a cavidade, dependendo de fatores como o uso final intencionado do artigo.

Os exemplos não limitadores de técnicas para o reparo da cavidade incluem a autocaldeação por difusão ativada (ADH), brasagem por

difusão, soldagem e técnicas de aspersão térmica, como aspersão oxi-combustível de alta velocidade de (HVOF); e combinações que incluem um ou mais desses métodos. Cada técnica é conhecida na arte, assim como também são conhecidos os detalhes para o uso em cada técnica para reparar defeitos  
5 como fendas do aerofólio.

As técnicas de soldagem são geralmente preferenciais para o reparo de materiais de superliga. Os exemplos não limitadores das técnicas de soldagem incluem soldagem por arco (por exemplo, soldagem a arco de material de proteção, soldagem a arco com gás de proteção (GMAW),  
10 soldagem a arco submerso; soldagem com gás de proteção inerte (MIG), ou soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG)); e soldagem com gás (por exemplo, soldagem com oxi-combustível).-(Em alguns casos, a soldagem MIG e soldagem GMAW são consideradas como sendo a mesma técnica). Aqueles elementos versados na técnica serão capazes de selecionar a técnica de  
15 soldagem mais apropriada para uma situação particular, com base, em parte, nos ensinamentos do presente documento.

A soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG) é a técnica de reparo preferencial em algumas modalidades dessa invenção. A técnica é algumas vezes referida por uma variedade de outros termos, como soldagem a  
20 arco com gás de tungstênio (GTAW) ou, algumas vezes, soldagem a heliarco. A soldagem TIG geralmente envolve o uso de um eletrodo de tungstênio não consumível para produzir a solda. Tipicamente, um suprimento de força de soldagem de corrente constante produz energia, que é conduzida ao longo do arco de tungstênio, através de uma coluna de vapores de metal e gás  
25 altamente ionizável, isto é, o plasma. Geralmente, a área de solda é protegida da contaminação atmosférica através de um gás de blindagem (por exemplo, um gás inerte como argônio). Os processos TIG frequentemente usam um metal de preenchimento.



Em algumas modalidades dessa invenção, a soldagem autógena pode ser executada, a qual não exige o material de preenchimento. Essa técnica de soldagem é usualmente prática se a cavidade, por exemplo, uma fenda, tiver uma largura que não seja maior do que cerca de 15% da  
5 espessura da parede que a envolve. A soldagem por feixe de elétrons ou a soldagem a laser é tipicamente usada para os processos autógenos.

Um tipo de técnica de soldagem é particularmente adequado para os materiais descritos no presente documento, e é conhecido como um processo "SWET" (soldagem de superliga em temperaturas elevadas). Essa  
10 técnica, frequentemente vista como uma subclasse de TIG, é descrita nas patentes U.S.6.996.906; 6.020.511, 6.124.568 e 6.297.474, que são incorporadas no presente documento a título de referência. Tipicamente, os processos de SWET são realizados dentro de um compartimento fechado no qual uma temperatura e atmosfera controladas são mantidas a fim de inibir o  
15 craqueamento e a oxidação de um componente de superliga a ser reparado. Aqueles elementos versados na técnica estão familiarizados com outros detalhes de SWET que poderiam ser relevantes para a presente revelação.

Em outras modalidades dessa invenção, um feixe de laser de alta energia é empregado para cortar uma região de contorno dentro do substrato  
20 de superliga. A figura 3 é uma ilustração simplificada de uma fenda relativamente profunda em uma pá de turbina, iniciada a partir da ponta da pá e propagada descendentemente na direção radial da pá. Conforme a compreensão por parte daqueles elementos versados na técnica, as paredes e o formato total da fenda podem ser muito irregulares ou entalhados. A fenda  
25 60 é formada sobre a superfície 62 de um substrato 64. Uma região de contorno ou "linha de corte" 66 é descrita na figura, representando a área a ser cortada do substrato. (Deve ser compreendido que, apesar da descrição bi-dimensional da figura, a fenda e a área que a envolve são atualmente tri-

dimensionais, de modo que a área será algumas vezes expressa no presente documento como um “volume”).

Em muitas modalidades, o corte da região de contorno é vantajoso por inúmeras razões. Primeiro, este permite o preenchimento da  
5 cavidade, por exemplo, através da soldagem, de acordo com dimensões precisas. Dessa maneira, a cavidade reparada é caracterizada por “formato próximo à forma final”, em relação ao tamanho e formato originais da área do substrato. Assim, etapas de usinagem e deposição adicionais podem ser minimizadas.

10 Secundariamente, o corte da região de contorno pode remover porções do substrato de superliga que são adjacentes à própria cavidade. A remoção dessa região é muitas vezes desejável porque o material óxido da superfície e outras impurezas se difundiram na região (usualmente após a exposição a condições de alto aquecimento ao longo do tempo). A superfície  
15 difundida poderia, de outra forma, não ser uma superfície ideal para o reparo subsequente através da soldagem ou outras técnicas.

O feixe de laser de alta energia usado para cortar a região de contorno pode ser o mesmo laser do que aquele que será usado para uma etapa de limpeza subsequente. Alternativamente, esse pode ser um laser  
20 diferente, por exemplo, um dos outros tipos descritos previamente. A escolha de um tipo particular de equipamento de laser depende em grande parte de um material particular a partir do qual o substrato é formado.

Em algumas modalidades preferenciais, um laser de onda contínua (CW) é usado. O laser CW deve ter uma boa “qualidade de feixe”, por  
25 exemplo, ter baixa divergência de feixe e, de preferência, ser altamente colimado. O feixe de laser para essa etapa de corte é caracterizado como um feixe de alta potência, com uma densidade de potência de pico na faixa de cerca de  $10^6$  watts/cm<sup>2</sup> a cerca de  $10^8$  watts/cm<sup>2</sup>, e mais especificamente, na

faixa de cerca de  $10^6$  watts/cm<sup>2</sup> a cerca de  $10^7$  watts/cm<sup>2</sup>. Em algumas modalidades preferenciais, um laser de fibra, laser CO<sup>2</sup> ou um laser de estado sólido é empregado.

Em outros casos, um laser de pulso poderia ser usado, por exemplo, um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto que tem uma taxa de pulso ("taxa de repetição") na faixa de cerca de 10 kHz a cerca de 100 kHz, e um valor de potência média na faixa de cerca de 5 watts a cerca de 30 watts. Nesse caso, a densidade de potência de pico seria usualmente na faixa de 0,1 gigawatt/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>. Além disso, como no caso do processo de limpeza a laser, o laser de alta potência para o processo de corte pode ser focalizado sobre o substrato através de um módulo de varredura.

Conforme aludido anteriormente, o uso do laser para cortar uma região de contorno ao redor da fenda ou outro tipo de defeito ou cavidade tem inúmeras vantagens. Por exemplo, o laser pode ser ajustado para cortar precisamente uma região selecionada do substrato. A região é grande o bastante para garantir a remoção de quaisquer materiais óxidos e qualquer material difundido dentro da região de substrato adjacente, mas pequena o bastante para minimizar o risco de danificar o volume do substrato, ou alterar drasticamente o seu formato. Em muitas modalidades preferenciais e com referência à figura 3, a região de contorno 66, formada pela linha de corte, é relativamente uniforme e lisa, quando comparada com a superfície interna ou "paredes" 67 da própria cavidade. (A região de contorno pode, então, ser caracterizada como um "volume de controle" liso).

Após a etapa de corte, a cavidade está usualmente pronta para processos de reparo adicionais, como a soldagem. Deve ser notado que qualquer material do tipo óxido ou outros contaminantes que poderiam estar presentes sobre a superfície da cavidade já foram removidos nesse estágio,

devido ao fato de a etapa de corte ter removido alguma parte do substrato subjacente. Entretanto, em alguns casos, pode ser desejável remover qualquer material de superliga de sustentação independente residual, saliências e “salpicos”. Uma variedade de técnicas poderia ser usada para esse propósito, por exemplo, enxágue de água, jateamento abrasivo, limpeza de leito fluidizado, e similares, ou algumas combinações de tais técnicas.

Em algumas modalidades, uma etapa de limpeza a laser é usada nesse estágio, como aquela descrita previamente. Essa etapa pode ser especialmente útil para a remoção de quaisquer materiais óxidos adicionais que possam ser formados. Como um exemplo, um ar ambiente pode encontrar seu caminho dentro da cavidade e da área de tratamento durante o processo de corte, reagindo com os constituintes do substrato para formar os óxidos indesejados. Os parâmetros para essa etapa de laser são geralmente os mesmos que aqueles descritos previamente, com o aparelho de laser de pulso sendo tipicamente usado. Além disso, essa etapa de “pós-corte” também pode ser acompanhada por outras etapas de limpeza, por exemplo, técnicas de enxágue de água ou jateamento abrasivo mencionadas acima.

Nesse estágio, a fenda ou outro defeito foram limpos e preparados para as etapas de reparo adicionais, conforme descrito previamente. Além disso, a área de reparo é definida fisicamente em um maneira precisa, de maneira que um formato muito próximo à forma final possa ser obtido após a conclusão das etapas de processamento adicionais. Em um cenário típico, a fenda pode ser agora preenchida com um material de reposição desejado, através de uma técnica adequada como soldagem, como descrita anteriormente. O processo de soldagem, por exemplo, resulta no preenchimento completo da região de contorno, que circunda a fenda, por meio disso reparando a fenda.

Embora essa invenção seja descrita em termos de modalidades

específicas, estas têm a única intenção de ilustração, e não devem ser construídas como sendo limitadoras em qualquer modo. Assim, deve ser compreendido que modificações podem ser feitas para a mesma, que estão incluídas no escopo da invenção e nas reivindicações em anexo. Todas as

5 patentes, pedidos de patente, artigos e textos que foram mencionados acima estão incorporados no presente documento a título de referência.

### REIVINDICAÇÕES

1. MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO DE SUPERLIGA (32), que inclui pelo menos uma cavidade (33) contendo material óxido de metal aderente sobre sua superfície (31), que compreende a  
5 etapa de direcionar um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto (46) contra a superfície da cavidade por um período de tempo suficiente para remover substancialmente todo o material óxido de metal aderente, sendo que o feixe de laser (46) é caracterizado por uma densidade de potência de pico situada na faixa de cerca de 10 megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>.

10 2. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que o feixe de pulsos de laser tem um comprimento de pulso de cerca de 1 nanossegundo a cerca de 1 microssegundo.

3. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a fonte (44) do feixe de laser (46) é um dispositivo selecionado a partir de um  
15 grupo que consiste em um laser de estado sólido, um laser de fibra e um laser excimer.

4. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que o feixe de laser (46) é focalizado sobre a superfície da cavidade (31) através de um módulo de varredura (48).

20 5. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a cavidade é uma fenda (33) dentro do substrato de superliga (32).

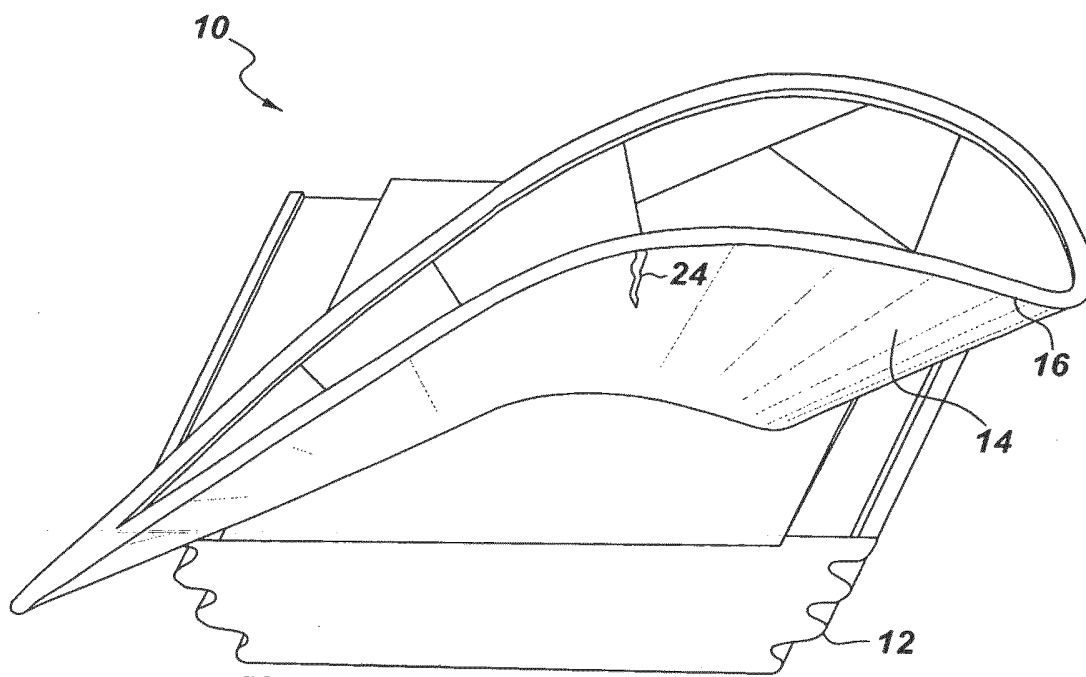
6. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que o óxido de metal aderente sobre a superfície da cavidade (31) compreende pelo menos um material selecionado a partir de um grupo que consiste em óxido de  
25 alumínio, óxido de zircônio, óxido de níquel, óxido de cromo, óxido de molibdênio e óxido de silício-alumínio-magnésio-cálcio (CMAS).

7. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que o substrato de superliga (10) é um componente do motor da turbina.

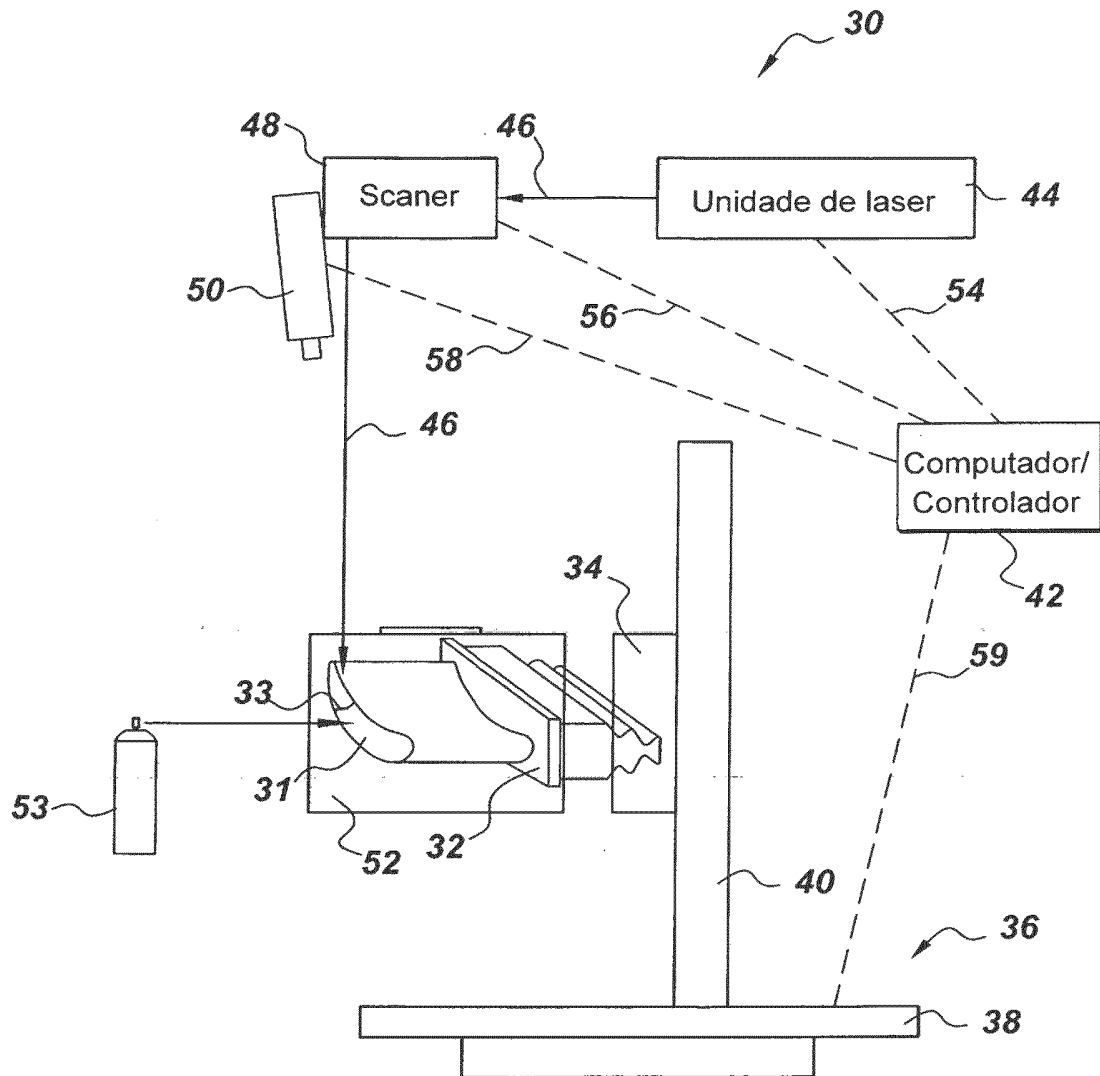
8. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, sendo que a cavidade (33) é uma e o dito método inclui adicionalmente a etapa de reparo da fenda.

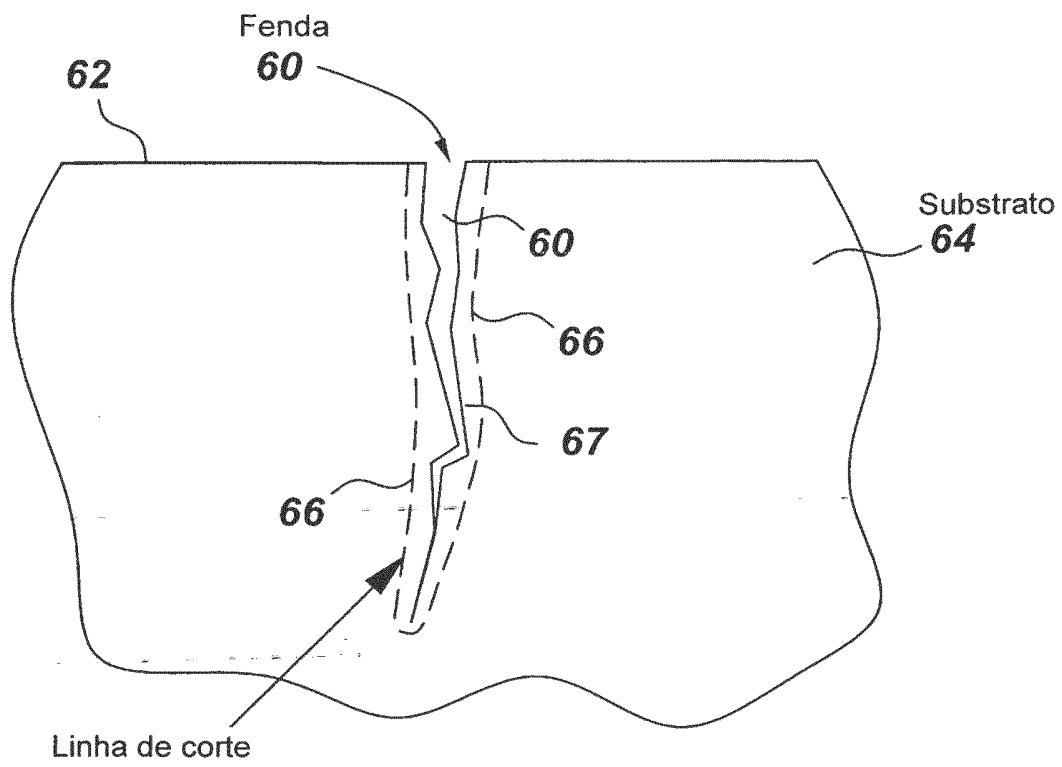
9. MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO  
5 DE SUPERLIGA (64), que inclui pelo menos uma cavidade (60) contendo material de óxido de metal aderente sobre sua superfície (62), e compreende a etapa de direcionar um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto de alta potência (46) para uma região sobre o substrato (62) que inclui a cavidade (60), sob as condições operacionais de laser que é capaz de cortar o  
10 material de superliga; de modo que a região de contorno (66) seja formada dentro do substrato (64), que inclui a cavidade (60).

~~10. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 9, sendo que~~  
pelo menos uma etapa de tratamento adicional é executada no substrato (64) antes de qualquer etapa de reparo da cavidade, e a etapa de tratamento  
15 adicional compreende uma etapa de limpeza a laser.

**Fig. 1**



**Fig. 2**



**Fig. 3**

## RESUMO

### **“MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE UM SUBSTRATO DE SUPERLIGA”**

Trata-se de um método descrito para o tratamento de um substrato de superliga (32) que inclui pelo menos uma cavidade (33) contendo material óxido de metal aderente sobre sua superfície (31). Um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto (46) é direcionado contra a superfície da cavidade por um período de tempo suficiente para remover substancialmente todo o material óxido de metal aderente. O feixe de laser (46) é caracterizado por uma densidade de potência de pico situada na faixa de cerca de 10 megawatts/cm<sup>2</sup> a cerca de 10 gigawatts/cm<sup>2</sup>. Em outra modalidade, um feixe de laser de alta taxa de repetição de pulso curto de alta potência é direcionado para uma região (62) sobre o substrato (64) que inclui a cavidade (60), sob as condições operacionais de laser que são capazes de cortar o material de superliga; de modo que uma região de contorno (66) seja formada dentro do substrato e que inclua a cavidade. A cavidade pode ser uma fenda em uma pá de turbina e a fenda (60) pode ser reparada após o tratamento através de soldagem ou outra técnica adequada.