

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

(21) **PI0617708-5 A2**

(22) Data de Depósito: 19/10/2006
(43) Data da Publicação: 02/08/2011
(RPI 2117)



★ B R P I 0 6 1 7 7 0 8 A 2 ★

(51) *Int.Cl.:*
B23K 26/14 2006.01

(54) Título: **PROCESSO DE SOLDAGEM POR FEIXE LASER COM CONTROLE DA FORMAÇÃO DO CAPILAR DE VAPORES METÁLICOS**

(30) Prioridade Unionista: 21/10/2005 FR 0553197

(73) Titular(es): Centre National De La Recherche Scientifique (CNRS), L'air Liquide, Société Anonyme Pour L'étude et L'exploitation Des Procédés Georges Claude

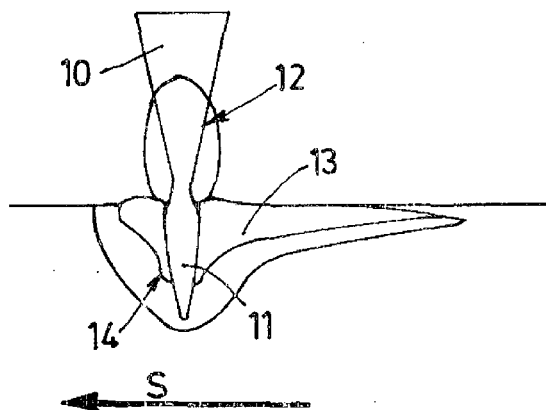
(72) Inventor(es): Eric Verna, Francis Briand, Frédéric Coste, Rémy Fabbro, Sonia Slimani

(74) Procurador(es): FLÁVIA SALIM LOPES

(86) Pedido Internacional: PCT FR2006051058 de 19/10/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2007/045798 de 26/04/2007

(57) Resumo: PROCESSO DE SOLDAGEM POR FEIXE LASER COM CONTROLE DA FORMAÇÃO DO CAPILAR DE VAPORES METÁLICOS A invenção refere-se um processo de soldagem por feixe laser de pelo menos uma peça metálica, preferivelmente de duas peças metálicas uma com a outra, na qual se utiliza um feixe laser (10), um primeiro fluxo de gás e um bocal de soldagem munido de um orifício de saída, o referido orifício atravessado pelo feixe laser e pelo primeiro fluxo de gás, e realiza-se uma soldagem da ou das peças por fusão do metal da ou das peças a serem soldadas, no ponto de impacto do feixe laser com a ou as peças a serem soldadas, com formação de um capilar (11) ou keyhole preenchido de vapores metálicos (12). Durante a soldagem, dirige-se o primeiro fluxo de gás unicamente para a abertura do capilar de vapores metálicos e de acordo com uma direção perpendicular à ou às peças a serem soldadas de maneira a exercer uma pressão dinâmica gasosa.



PROCESSO DE SOLDAGEM POR FEIXE LASER COM CONTROLE DA
FORMAÇÃO DO CAPILAR DE VAPORES METÁLICOS

A invenção refere-se a um processo de soldagem laser no qual se controla a hidrodinâmica do banho líquido graças a um débito gasoso focalizado sobre o capilar que se forma no ponto de impacto do feixe laser, durante a soldagem.

Na soldagem por feixe laser, a realização de uma soldagem entre duas peças se baseia sobre o fenômeno de fusão e vaporização da matéria no ponto de impacto do feixe laser.

Para densidades de potência específicas, suficientemente elevadas, ou seja, cerca de MW/cm^2 , um capilar ou *keyhole* preenchido de vapores metálicos forma-se no material e permite uma transferência direta da energia ao núcleo da matéria.

As paredes do capilar são formadas de metal em fusão e são mantidas graças um equilíbrio dinâmico que se estabelece com os vapores internos. Em função do movimento, o metal derretido contorna o capilar para formar à traseira deste último "banho líquido".

A presença desta cavidade ao núcleo do banho líquido constantemente em movimento é origem de instabilidades que dão nascimentos a numerosos defeitos susceptíveis de degradar a qualidade da soldagem assim obtida.

Na realidade, observando a cena de soldagem através de uma câmera, constata-se que fortes instabilidades desenvolvem-se à superfície do banho de soldagem ao contato dos vapores ejetados, formando "ondulações". Os vapores metálicos ejetados do capilar provocam ocasionalmente também gotinhas de metal líquido. O banho líquido pode as

vezes, sob a ação de seu peso, desmoronar e obstruir temporariamente o capilar que provoca fortes instabilidades.

Então, os aspectos de superfície das cordas são
5 freqüentemente muito ásperos e turbulentos, as porosidades aparecem e fragilizam o cordão de solda obtido.

Em outras palavras, os cordões de solda obtidos são de má qualidade.

O documento Kamimuki et al, *Prevention of welding*
10 *defect by side gas flow and its monitoring method in continuous wave Nd:Yag laser welding*, J. of Laser Appl., 14 (3), p. 136-145, 2002, explica que um jato de gás lateral emitido através de um bocal cilíndrico clássico, de pequeno diâmetro e posicionado unicamente à traseira do *keyhole*,
15 pode às vezes diminuir as projeções bem como as porosidades num cordão de solda.

No entanto, um problema essencial desta solução reside na grande dificuldade de posicionamento do bocal. Na realidade, é suficiente que a pressão do jato de gases seja
20 ligeiramente importante ou deslocada de alguns milímetros à traseira do capilar para fechar novamente este último e aumentar as instabilidades do banho líquido, o que conduz ao efeito inverso do procurado.

Além disso, com tal bocal, pode-se soldar apenas em um
25 único sentido, o que não é prático ao plano industrial onde soldas devem poder ser feitas de acordo com várias direções em função da complexidade das peças a serem soldadas.

Além disso, os documentos JP-A-61229491, JP-A-04313485 e US-A-4684779 propõem os processos de soldagem a laser com
30 gases auxiliares. Um ou vários fluxos gasosos são enviados

para as peças a serem soldadas para eliminar as impurezas gasosas que se encontram na atmosfera ambiente a nível da zona de soldagem. Em outros termos, nesses documentos, os fluxos gasosos são liberados sob fraca pressão e servem
5 unicamente para estabelecer uma atmosfera gasosa protetora da zona de soldagem.

Tais processos não permitem melhorar a qualidade dos cordões de soldagem produzidos porque o ou os fluxos gasosos exercem uma pressão única sobre o banho de
10 soldagem, forçando o metal fundido para o capilar, provocando assim uma desestabilização do capilar ou simplesmente a sua obstrução.

O problema que se coloca então é melhorar os processos de soldagem a laser existentes de maneira a aumentar a
15 qualidade dos cordões de solda, evitando fenômenos nefastos supracitados.

A solução da invenção deve igualmente ser utilizável no plano industrial, ou seja, ser de arquitetura simples e apresentar uma grande flexibilidade de utilização, em
20 especial não ser limitada a um sentido de soldagem.

A solução da invenção é um processo de soldagem por feixe laser de pelo menos uma peça metálica, preferivelmente de duas peças metálicas uma com a outra, no qual:

25 a) utiliza-se um feixe laser, um primeiro fluxo de gases e um bocal de soldagem munido de um orifício de saída, o referido orifício estando atravessado pelo feixe laser e o primeiro fluxo de gás, e

b) realiza-se uma soldagem da ou das peças por fusão
30 do metal da ou das peças a serem soldadas, no ponto de

impacto do feixe laser com a ou as peças a serem soldadas, com formação de um capilar ou *keyhole* preenchido de vapores metálicos.

De acordo com a invenção, durante a soldagem, dirige-se o primeiro fluxo de gases unicamente para a abertura do capilar de vapores metálicos e de acordo com uma direção perpendicular a ou as peças a serem soldadas de maneira a exercer uma pressão dinâmica gasosa e manter o *keyhole* aberto alargando.

No âmbito da invenção, chama-se "abertura do capilar (ou *keyhole*) de vapores metálicos", a zona do capilar que se encontra à superfície da chapa a serem soldadas e pela qual escapam-se os vapores metálicos. A este título, o esquema da Figura 5 ilustra uma vista em corte longitudinal da zona de soldagem no curso de processo de soldagem por feixe laser 10. Distingue-se, de uma parte, uma representação do capilar 11 do qual se escapam vapores metálicos 12 e, de outra parte, as paredes de metal líquido 14 que formam um banho na traseira 13. A seta designa o sentido S da soldagem.

Segundo o caso, o processo da invenção pode compreender uma ou várias das características seguintes:

- utiliza-se o primeiro fluxo de gás para exercer uma pressão dinâmica gasosa contínua e constante sobre a abertura do capilar de vapores.

- utiliza-se o primeiro fluxo de gás para operar uma estabilização do escoamento do banho líquido de metal em fusão.

- utiliza, além disso, um segundo fluxo de gás de proteção distribuído perifericamente ao primeiro fluxo de

gás.

- utiliza-se um segundo fluxo de gás de proteção distribuído coaxialmente ao primeiro fluxo de gás em relação ao eixo do feixe laser.

5 - a vazão do primeiro gás é da ordem de 10 à 20 l/min e a vazão do segundo gás é da ordem de 20 à 30 l/min.

- o bocal é um bocal coaxial.

- o primeiro e o segundo gás são escolhidos entre o argônio, hélio, nitrogênio e suas misturas, e eventualmente
10 uma menor proporção de CO₂, oxigênio ou hidrogênio.

- o feixe laser é gerado por um gerador laser do tipo Nd:YAG, fibra Ytterbium ou de CO₂.

- o bocal de soldagem é levado por um braço robotizado.

15 - a ou as peças metálicas a serem soldadas são de aço carbono, coberto ou não, em alumínio ou aço inoxidável.

- o bocal de soldagem que emite o primeiro fluxo de gás tem uma seção de passagem do gás compreendida entre 0,1 e 10 mm².

20 - a pressão do primeiro fluxo de gás é compreendida entre 1 e 10 kPa. A presente invenção se baseia então sobre uma estabilização do escoamento do banho líquido durante a soldagem, agindo sobre a abertura do *keyhole* via um primeiro jato ou fluxo de gás "rápido" orientado para ou
25 sobre a referida abertura do capilar de forma a exercer uma pressão dinâmica gasosa neste lugar para estabilizar a forma, ou mesmo aumentá-la, e assim resolver os problemas supracitados.

Na realidade, graças a esta pressão dinâmica, o
30 capilar permanece aberto porque a pressão do primeiro gás o

alarga e os vapores metálicos gerados no capilar podem escapar sem ser perturbados pelo banho de metal em fusão contígua.

O número de projeções encontra-se notavelmente
5 reduzido e o escoamento hidrodinâmico do metal líquido facilitado, conduzindo a um aspecto dos cordões de soldagem melhorado e uma redução das porosidades na soldagem dado que os vapores metálicos não se encontram mais ou muito menos presos.

10 Em adição, um segundo jato de gás de proteção com vazão mais lenta, como habitualmente utilizado em soldagem a laser, é distribuído em periferia de forma a proteger o banho de soldagem da oxidação formando uma proteção ou cobertura gasosa ao redor da zona de soldagem.

15 Em outras palavras, a solução da invenção utiliza preferencialmente um primeiro jato de gás "rápido" de estabilização distribuído de maneira simétrica em relação ao eixo do feixe laser dirigido ou focalizado sobre a abertura do *keyhole* e um segundo jato de gás "lento" de
20 cobertura ou proteção da zona de soldagem.

O gás focalizado é dito "rápido" se possui ou adquire uma energia cinética suficiente para exercer uma pressão dinâmica suficiente sobre do *keyhole* a fim de mantê-lo aberto. Por oposição, o gás de cobertura é dito "lento"
25 porque não deve perturbar o escoamento do banho líquido, mas prevenir o contato deste último com o oxigênio do ar ambiente.

As vazões são da ordem de 10 a 20 l/min para o primeiro gás rápido e de 20 a 30 l/min para o segundo gás
30 lento de cobertura. A seção de passagem do gás "rápido" é

compreendida tipicamente entre 0,1 e 10 mm². Na realidade, o diâmetro de passagem do gás é exatamente superior a alguns 10^e de milímetro do qual o feixe laser a saída do bocal.

5 As vazões de gases estabelecidas dependem diretamente da densidade do gás utilizado para obter uma pressão dinâmica eficaz. Esta pressão é tipicamente da ordem de alguns kPa.

10 A escolha específica das vazões gasosas mais adequadas para uma operação de soldagem dada pode por conseguinte ser feita empiricamente por um de habilidade na técnica em função das condições de soldagem que desejam ser utilizadas, especialmente do tipo de material que deve soldar, da natureza do gás do que é disposto, da potência
15 do gerador laser que será utilizado.

Os jatos ou fluxos de gases podem ser distribuídos por um bocal único do tipo "duplo fluxo", ou seja, que distribui dois fluxos de gases coaxiais um em relação ao outro, ainda chamado bocal "coaxial", como mostrado nas
20 Figuras 1 a 4. Este princípio pode ser estendido aos vários fluxos gasosos concêntricos, especialmente três.

De maneira alternativa, o gás rápido de focalização pode ser liberado assim por vários bocais arrançados de maneira adequada, por exemplo, quatro bocais de menor
25 diâmetro, tipicamente inferior a 3 mm, concorrentes com um ângulo entre 20° e 45° em relação ao eixo do feixe, posicionados regularmente sendo repartido à periferia de um bocal anular de proteção clássica que distribui o gás "lento".

30 É necessário notar que utiliza-se de preferência gases

idênticos como primeiro e segundo fluxo de gás. No entanto, estes gases podem também ser diferentes.

Assim, em soldagem a laser do tipo Nd: YAG, utiliza-se em geral argônio como gás de proteção do feixe laser, enquanto que em soldagem a laser do tipo CO₂, o hélio é necessário para evitar o fenômeno de ruptura.

No entanto, para certas aplicações, pode-se também utilizar misturas gasosas de tipo hélio/nitrogênio, hélio/argônio ou qualquer outra mistura à base de hélio para os feixes procedentes de geradores laser do tipo CO₂ bem como todo gás neutro para os feixes procedentes de geradores laser do tipo YAG ou do tipo laser a fibra.

Do mesmo modo, pode-se utilizar argônio, nitrogênio, hélio ou as misturas destes gases, adicionados além de um ou vários constituintes adicionais em baixo teor (alguns %) como o oxigênio, CO₂, hidrogênio.

As Figuras 1 a 4 esquematizam vários modos de realização de bocais "coaxiais" de acordo com a invenção.

Como vê-se sobre estas Figuras 1 a 4, um bocal coaxial é um bocal formado de pelo menos dois circuitos de distribuição de gases concêntricos.

A figura 1 apresenta uma primeira versão de bocal coaxial. O jato de gás rápido é distribuído ao centro do bocal através de um orifício 1 de diâmetro compreendido entre 0,2 e 3 mm para a abertura do *keyhole*.

O gás de cobertura quanto a ele é difundido na coroa 2 concêntrica a abertura 1. O perfil da coroa 2 pode ser escolhido tal como um efeito de parede seja obtido, isto é, que a direção de escoamento do gás lento siga a curvatura da parede como mostra o vetor 3.

A figura 2 apresenta uma versão de bocal na qual o efeito de parede é utilizado para focalizar o escoamento do gás rápido ao longo do eixo do feixe laser. Neste modo de realização, três circuitos de passagem do gás são
5 previstos: um circuito axial 4 para uma distribuição de gás lento e de baixa vazão, servindo principalmente para evitar o aumento de poluições para as lentes do laser, um primeiro circuito 5 periférico que canaliza o gás rápido para a abertura do *keyhole* e um segundo circuito 6 que distribui o
10 gás lento de cobertura.

A figura 3 ilustra uma realização na qual a cobertura gasosa do gás lento é alargada graças a uma distribuição em "turbilhão", ou seja com uma componente de rotação que tende a eliminar o gás horizontalmente na saída do bocal.

15 A figura 4 apresenta um bocal no qual o gás rápido é acelerado através de uma tubulação, ou seja, de um orifício convergente-divergente.

Um interesse principal da utilização de um bocal coaxial reside na sua facilidade de posicionamento e sua
20 independência em relação ao sentido de deslocamento da cabeça de soldagem que porta o bocal. Isto implica que pode, por exemplo, pôr-se diretamente à extremidade do braço de um robô no caso de uma soldagem com laser do tipo Nd:YAG onde o feixe laser é gerado por um gerador do tipo
25 Nd:YAG antes de ser encaminhado via uma fibra óptica até cabeça laser que porta o bocal.

Em todos os casos, utilizando o processo da invenção com tal bocal coaxial, um primeiro jato de gás é acelerado e confinado em direção da abertura do capilar, o que
30 permite alterar o escoamento à traseira do capilar.

O capilar está então mais aberto ao longo da direção de soldagem e o escoamento do banho líquido é regular, contínuo e sem nenhuma oscilação na superfície.

5 No caso de uma soldagem com oscilador laser do tipo Nd: YAG, o cordão de solda é muito liso e a "estrutura em viga" característica da soldagem por laser Nd:YAG, pode ser suprimida completamente.

10 Naturalmente, a vazão do jato de gás deve ser mais elevada que um escoamento clássico, mas não tão importante a fim de evitar a ejeção de metal fundido.

Uma aplicação da invenção apresenta também a vantagem de conduzir um aumento notável a profundidade de penetração de soldagem.

15 Assim, ensaios realizados com um jato de gás dirigido e confinado sobre a abertura do capilar mostraram um ganho em penetração de 25%.

20 Isto pode explicar-se pelo fato de que, se considerar que o capilar é alongado pelo jato de gás de acordo com a invenção, o feixe laser é muito menos interrompido pelas flutuações da frente traseira do capilar.

25 Além disso, pelo fato da abertura mais importante do capilar devido ao jato de gás, obtém-se um plasma menos denso e por consequência absorve-se menos o feixe laser quando uma soldagem com oscilador laser do tipo CO₂ por exemplo.

O alongamento do capilar permite igualmente fortemente diminuir as porosidades geradas no cordão de solda, durante a soldagem a laser.

30 Quando o escoamento do banho líquido é estabilizado via jato de gás convergente da invenção, atenua-se as

enlameaduras de metal em fusão e o fenômeno de ejeção de gotinhas metálicas pode ser completamente eliminado.

A utilização de um bocal coaxial que confina o jato de gás rápido sobre a abertura do capilar pode eficazmente
5 controlar a hidrodinâmica do banho líquido.

O escoamento deste último pode ser então muito bem estabilizado e as projeções de gotinhas metálicas completamente suprimidas, o que permite chegar muito a uma boa qualidade de cordão de solda com uma profundidade de
10 penetração melhorada, à baixa velocidade de soldagem, ou seja, menos de 3 m/min.

Este processo de soldagem com jato rápido, por conseguinte, é adaptado às aplicações de soldagem a laser das espessuras médias, ou seja de 1 a cerca de 5 mm.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de soldagem por feixe laser de pelo menos uma peça metálica, preferivelmente de duas peças metálicas uma com a outra, no qual:

5 a) utiliza-se um feixe laser, um primeiro fluxo de gás e um bocal de soldagem munido de um orifício de saída, o referido orifício atravessado pelo feixe laser e pelo primeiro fluxo de gás, e

b) realiza-se uma soldagem da ou das peças por fusão
10 do metal da ou das peças a serem soldadas, no ponto de impacto do feixe laser com as peças a serem soldadas, com formação de um capilar ou *keyhole* preenchido de vapores metálicos,

caracterizado pelo fato de que, durante a soldagem,
15 dirige-se o primeiro fluxo de gás unicamente para a abertura do capilar de vapores metálicos e de acordo com uma direção perpendicular a ou as peças a serem soldadas de maneira a exercer uma pressão dinâmica gasosa e manter o *keyhole* aberto.

20 2. Processo, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que utiliza-se o primeiro fluxo de gás para exercer uma pressão dinâmica gasosa contínua e constante sobre a abertura do capilar de vapores.

3. Processo, de acordo com a reivindicação 1 ou 2,
25 caracterizado pelo fato de que utiliza-se o primeiro fluxo de gás para operar uma estabilização do escoamento do banho líquido de metal em fusão.

4. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2 ou 3, caracterizado pelo fato de que
30 utiliza-se, além disso, um segundo fluxo de gás de proteção

distribuído perifericamente ao primeiro fluxo de gás.

5 5. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3 ou 4, caracterizado pelo fato de que utiliza-se um segundo fluxo de gás de proteção distribuído coaxialmente ao primeiro fluxo de gás em relação ao eixo do feixe laser.

10 6. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4 ou 5, caracterizado pelo fato de que a vazão do primeiro gás é da ordem de 10 a 20 l/min e a vazão do segundo gás é da ordem de 20 a 30 l/min.

 7. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5 ou 6, caracterizado pelo fato de que o bocal é um bocal coaxial.

15 8. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 7, caracterizado pelo fato de que o primeiro e o segundo gás são escolhidos entre o argônio, o hélio, o nitrogênio e as suas misturas, e eventualmente além de baixa proporção de CO₂, do oxigênio ou do hidrogênio.

20 9. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ou 8, caracterizado pelo fato de que o feixe laser é gerado por um gerador laser do tipo Nd:YAG, a fibra de Ytterbium ou de CO₂.

25 10. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ou 9, caracterizado pelo fato de que o bocal de soldagem é levado por um braço robotizado.

30 11. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ou 10, caracterizado pelo fato de que as peças metálicas a serem

soldadadas são de aço carbono, coberto ou não, em alumínio ou aço inoxidável.

12. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ou 11,
5 caracterizado pelo fato de que o bocal de soldagem que libera o primeiro fluxo de gás tem uma seção de passagem do gás compreendida entre 0,1 e 10 mm².

13. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ou 12,
10 caracterizado pelo fato de que a pressão do primeiro fluxo de gás é compreendida entre 1 e 10 kPa.

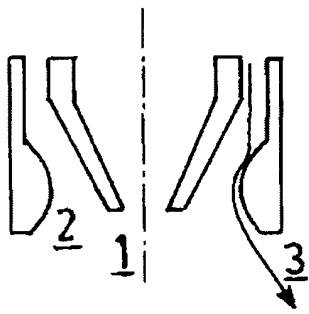


FIG. 1

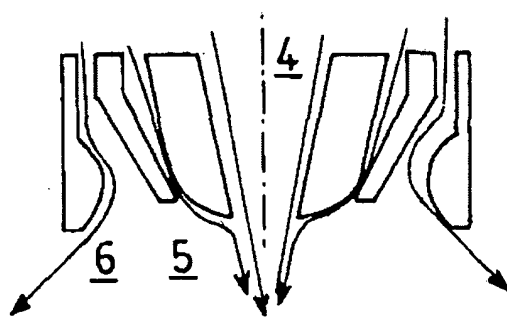


FIG. 2

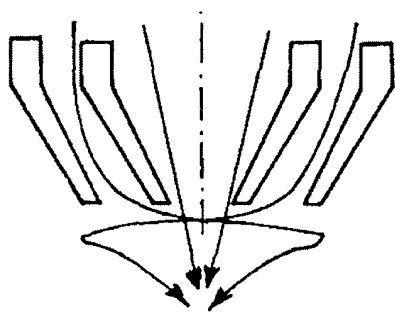


FIG. 3

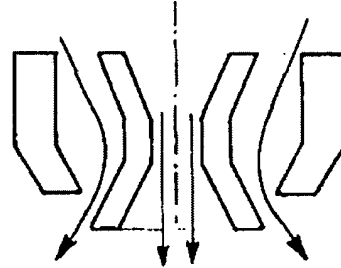


FIG. 4

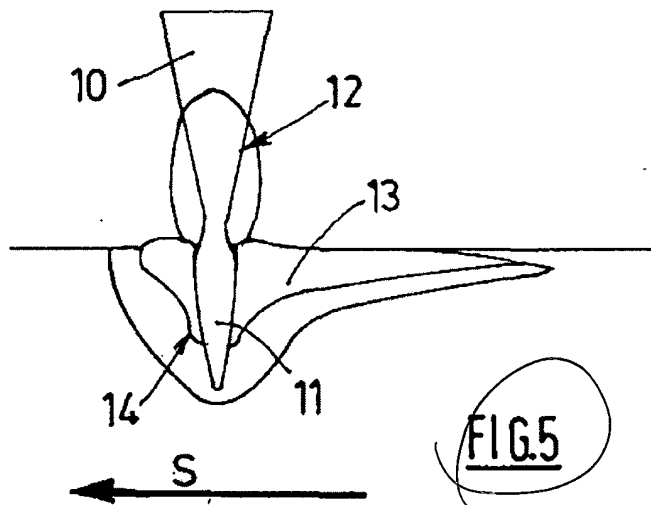


FIG. 5

PROCESSO DE SOLDAGEM POR FEIXE LASER COM CONTROLE DA
FORMAÇÃO DO CAPILAR DE VAPORES METÁLICOS

A invenção refere-se um processo de soldagem por feixe laser de pelo menos uma peça metálica, preferivelmente de
5 duas peças metálicas uma com a outra, na qual se utiliza um feixe laser (10), um primeiro fluxo de gás e um bocal de soldagem munido de um orifício de saída, o referido orifício atravessado pelo feixe laser e pelo primeiro fluxo de gás, e realiza-se uma soldagem da ou das peças por fusão
10 do metal da ou das peças a serem soldadas, no ponto de impacto do feixe laser com a ou as peças a serem soldadas, com formação de um capilar (11) ou keyhole preenchido de vapores metálicos (12). Durante a soldagem, dirige-se o primeiro fluxo de gás unicamente para a abertura do capilar
15 de vapores metálicos e de acordo com uma direção perpendicular à ou às peças a serem soldadas de maneira a exercer uma pressão dinâmica gasosa.