



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

(11) PI 1007895-9 B1



(22) Data do Depósito: 01/02/2010

(45) Data de Concessão: 07/04/2020

(54) Título: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS ESTAMPADAS REVESTIDAS E PEÇAS PREPARADAS A PARTIR DO MESMO

(51) Int.Cl.: B32B 15/01; C21D 1/70.

(30) Prioridade Unionista: 02/02/2009 EP PCT/EP2009/000670.

(73) Titular(es): ARCELORMITTAL INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, S.L..

(72) Inventor(es): ISABELLE THIRION; THOMAS VIETORIS; RAISA GRIGORIEVA; PASCAL DRILLET; LUDWIG SCHALLER; KARL MICHAEL BADER; UWE PAAR; MICHAEL ALSMANN.

(86) Pedido PCT: PCT EP2010000586 de 01/02/2010

(87) Publicação PCT: WO 2010/086186 de 05/08/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 02/08/2011

(57) Resumo: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS ESTAMPADAS REVESTIDAS E PEÇAS PREPARADAS A PARTIR DO MESMO A invenção refere-se a um processo de fabricação de uma peça revestida estampada a quente, compreendendo as seguintes etapas sucessivas: provisão de uma folha de aço laminada a quente ou laminada a frio, compreendendo um substrato de aço e um pré-revestimento de liga de alumínio-silício, o pré-revestimento contendo mais de 50% de alumínio livre e tendo uma espessura entre 15 e 50 micrômetros; depois, corte da folha de aço para obtenção de um pedaço de metal laminado pré-revestido; em seguida, aquecimento do pedaço de metal laminado sob uma atmosfera não-protetora, até uma temperatura T_i , entre $T_e - 10^\circ\text{C}$ e T_e , T_e sendo a temperatura eutética ou fracionada do pré-revestimento; depois, aquecimento do pedaço de metal laminado da temperatura T_i até uma temperatura T_m entre 840 e 950°C , sob uma atmosfera não-protetora, com uma velocidade de aquecimento (V) entre 30°C/s e 90°C/s , (V) sendo a velocidade de aquecimento entre a temperatura T_i e a temperatura T_m , a fim de se obter um pedaço de metal laminado aquecido revestido, em seguida, impregnação do pedaço de metal laminado revestido na referida temperatura T_m , por um (...).

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS ESTAMPADAS REVESTIDAS E PEÇAS PREPARADAS A PARTIR DO MESMO"**.

[0001] A presente invenção refere-se a um método para fabricação de peças estampadas, preparadas a partir de folha de aço pré-revestida com liga de alumínio-silício, e a produtos revestidos estampados obtidos por esse método. O uso de processo de estampagem a quente de folhas pré-revestidas para a fabricação de peças tem se tornado amplamente difundido, especificamente, na indústria automotiva, uma vez que permite a produção de peças com alta resistência mecânica e satisfatória resistência a choques. O pré-revestimento metálico evita a oxidação e descarburização do substrato de aço durante o aquecimento do forno, antes da estampagem a quente. Mediante interdifusão entre o pré-revestimento e o substrato de aço, uma liga intermetálica com alta temperatura de fusão é formada no revestimento. A temperatura de aquecimento é escolhida de modo a austenitizar o aço, assim, é também obtido uma adicional têmpera do substrato de aço mediante resfriamento rápido das ferramentas de conformação. O documento de patente Europeu, EP 0971044, divulga um processo de estampagem a quente com folhas de aço pré-revestidas com um revestimento à base de liga de alumínio ou silício; as peças obtidas após a estampagem a quente oferecem alta resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga e são adequadas para posterior pintura.

[0002] A Publicação Internacional de Patente WO 2008/053273 divulga um processo de estampagem a quente, em que as etapas de aquecimento e austenitização no forno são escolhidas de modo a se obter uma sucessão de quatro diferentes camadas no revestimento da peça estampada: a velocidade de aquecimento para uma elevação de temperatura entre 20 e 700°C é compreendida entre 4 e 12°C/s. Isso possibilita a obtenção de aperfeiçoada soldabilidade de ponto, com

essa particular configuração de camadas. Assim, pedaços de metal laminados de aço pré-revestidos são transportados em rolos laminadores nos fornos durante o aquecimento, antes da etapa de estampagem a quente. De acordo com a Publicação Internacional de Patente WO 2008/053273, as condições de aquecimento dos pedaços de metal laminados pré-revestidos de alumínio são também escolhidas, de modo a evitar a fusão do revestimento, o que poderia levar à formação de resíduos nos rolos laminadores nos fornos. Como consequência dessa formação de resíduos, a linha de produção, algumas vezes, tem de ser temporariamente parada para manutenção, o que reduz a produtividade.

[0003] Além disso, a duração do aquecimento e impregnação dos pedaços de metal laminados pode ser da ordem de alguns minutos. Como consequência, a extensão dos fornos onde os pedaços de metal laminados estão percorrendo pode ser um fator bastante importante, o que é uma preocupação do ponto de vista industrial. Portanto, existe uma importante necessidade de se encurtar a extensão das linhas de aquecimento.

[0004] Tentativas têm sido feitas para aumentar a produtividade do processo mediante redução da duração de impregnação na temperatura de austenitização; entretanto, essa abordagem tem suas limitações, uma vez que um tempo suficiente é necessário para a interdifusão dos elementos do substrato de aço, particularmente, do ferro, com o revestimento à base de alumínio. Além disso, a redução do tempo de aquecimento é também um problema, uma vez que a fusão do revestimento ocorre em velocidades de aquecimento demasiadamente rápidas, o que proporciona uma superfície do revestimento lisa e, conseqüentemente, uma fraca aderência da pintura na peça estampada.

[0005] Portanto, ao se partir de folhas de aço pré-revestidas à base de Al, permanece a necessidade de um processo de fabricação que

possibilite a preparação de peças ou produtos estampados com alta resistência mecânica, e que ofereça superior capacidade para uma posterior pintura. Assim, permanece também a necessidade de um processo que possibilite a obtenção de peças cujo revestimento seja bastante aderente ao substrato nas temperaturas de fabricação ou manutenção, e que ainda ofereça superior resistência ao fissuramento e corrosão. Também, permanece a necessidade de um processo de aumentada produtividade, que possibilite evitar a obstrução dos rolos de laminação. Assim, constitui um objetivo da presente invenção, solucionar os problemas mencionados acima e proporcionar um novo processo para a produção de peças estampadas a quente, preparadas a partir de uma folha de aço pré-revestida com uma liga de alumínio-silício.

[0006] Outro objeto da presente invenção é proporcionar um processo para fabricação de peças estampadas a quente, as quais podem ser usadas em veículos a motor. Ainda outro objeto da presente invenção é proporcionar novos métodos de fabricação de peças estampadas, cujos revestimentos combinam as propriedades de uma alta aderência ao substrato do aço, capacidade de pintura e resistência ao fissuramento.

[0007] Constitui outro objeto da invenção, proporcionar uma peça com um novo revestimento após estampagem a quente, que combine as propriedades de alta capacidade para pintura e resistência ao fissuramento e corrosão.

[0008] Assim, constitui um objeto da presente invenção um processo de fabricação de uma peça revestida estampada a quente, compreendendo as seguintes sucessivas etapas, na ordem aqui apresentada:

- provisão de uma folha de aço laminada a quente ou laminada a frio, compreendendo um substrato de aço e um pré-

revestimento de liga de alumínio-silício, o pré-revestimento contendo mais de 50% de alumínio livre e tendo uma espessura compreendida entre 15 e 50 micrômetros; depois,

- corte da folha de aço para obtenção de um pedaço de metal laminado de aço pré-revestido; depois,

- aquecimento do pedaço de metal laminado sob uma atmosfera não-protetora, até uma temperatura T_i , compreendida entre $T_e - 10^\circ\text{C}$ e T_e , T_e sendo a temperatura eutética ou fracionada do pré-revestimento; em seguida,

- aquecimento do pedaço de metal laminado da temperatura T_i até uma temperatura T_m , compreendida entre 840 e 950°C , sob uma atmosfera não-protetora, com uma velocidade de aquecimento (V) compreendida entre 30°C/s e 90°C/s , (V) sendo a velocidade de aquecimento entre a temperatura T_i e a temperatura T_m , a fim de se obter um pedaço de metal laminado aquecido revestido, depois,

- impregnação do pedaço de metal laminado revestido na dita temperatura T_m , por um período de tempo t_m compreendido entre 28 s e 90 s; depois,

- estampagem a quente do pedaço de metal laminado, a fim de obter uma peça revestida estampada a quente; depois,

- resfriamento da dita peça estampada sob uma velocidade de resfriamento, a fim de formar uma microestrutura no substrato de aço, compreendendo pelo menos um constituinte escolhido entre martensita e bainita.

[0009] De acordo com uma modalidade preferida, a velocidade de aquecimento (V) entre as temperaturas T_i e T_m é compreendida entre 50 e 80°C/s . De acordo com outra modalidade preferida, o pré-revestimento compreende 5-11% em peso de Si, 2-4% em peso de Fe, opcionalmente, entre 50 e 700 ppm de Sr, o restante sendo Al e impurezas inerentes ao processo, a temperatura T_i sendo compreendida

entre 567 e 577°C e a temperatura T_m sendo compreendida entre 855 e 950°C. Outro objetivo da invenção é um processo de fabricação de uma peça revestida estampada a quente, compreendendo as seguintes sucessivas etapas, na ordem aqui apresentada:

- provisão de uma folha de aço laminada a quente ou laminada a frio, compreendendo um substrato de aço e um pré-revestimento de liga de alumínio-silício, o pré-revestimento contendo mais de 50% de alumínio livre e tendo uma espessura compreendida entre 15 e 50 micrômetros; depois,

- corte da folha de aço para obtenção de um pedaço de metal laminado de aço pré-revestido; depois,

- aquecimento do pedaço de metal laminado de aço sob uma atmosfera não-protetora, a uma velocidade de aquecimento (V) até uma temperatura T_m , a fim de transformar totalmente a microestrutura do substrato de aço em austenita e obter, imediatamente após o aquecimento e antes da posterior impregnação, entre 10 e 60% de fase líquida na superfície do pré-revestimento; em seguida,

- transformação da fase líquida do pré-revestimento na temperatura T_m , durante um período de impregnação t_m , a fim de se obter um pedaço de metal laminado aquecido revestido, com um revestimento tendo entre 0 e 30% de fase líquida na sua superfície no final do dito período de impregnação, e compreendendo entre 20 e 50% em peso de Fe na sua superfície; depois,

- estampagem a quente do pedaço de metal laminado, a fim de obter uma peça estampada a quente; e, finalmente,

- resfriamento da dita peça estampada, a fim de formar uma microestrutura no dito substrato de aço, compreendendo pelo menos um constituinte escolhido entre martensita e bainita.

[00010] Preferivelmente, o aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aquecimento por indução. De acordo com

uma modalidade preferida, o aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aquecimento por resistência.

[00011] Preferivelmente, o aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aquecimento por infravermelho.

[00012] De acordo com uma modalidade preferida, o aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, por meio de queimadores a gás. Em um modo particular, o aquecimento é realizado por meio de qualquer combinação dos processos de aquecimento mencionados acima.

[00013] Preferivelmente, a espessura total do revestimento é compreendida entre 20 e 60 micrômetros.

[00014] O objetivo da invenção é também uma peça revestida estampada a quente, compreendendo um substrato de aço tendo uma microestrutura que compreende pelo menos um constituinte escolhido entre bainita ou martensita, e um revestimento sobre cada um dos dois lados do dito substrato, o revestimento sendo composto das seguintes camadas contendo Si na solução sólida, partindo da camada contígua ao dito substrato de aço:

- uma camada de Fe_3Al ;

- uma camada de FeAl ou camada de fases τ_1 ou τ_2 sobre a camada de Fe_3Al ;

- uma camada externa composta de mais de 70% de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 , dita camada de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 contendo uma fase menos descontínua de FeAl , ou fases de τ_1 ou τ_2 sobre a dita camada de FeAl ou de τ_1 ou τ_2 , dita camada externa tendo mais de 70% de cristais na sua superfície.

[00015] Preferivelmente, a camada de FeAl ou de τ_1 ou τ_2 sobre a dita camada de Fe_3Al , apresenta menos de 13% de Si na solução sólida, e as ditas camadas de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 na dita camada externa apresentam menos de 6% de Si na solução sólida, e a dita fase menos descontínua de FeAl ou de τ_1 ou τ_2 , apresenta menos de 13% de Si na

solução sólida.

[00016] Preferivelmente, a soma da espessura da dita camada de Fe_3Al e dita camada de FeAl , ou da camada de fases τ_1 ou τ_2 , é menor que $1/3$ da espessura total do dito revestimento. Em um modo preferido, a espessura do revestimento em cada um dos ditos lados é compreendida entre 20 e 60 micrômetros.

[00017] Outras vantagens e características irão ser apresentadas na descrição e nas modalidades exemplificativas abaixo, fazendo-se referência às figuras anexas, nas quais:

- a figura 1 mostra uma vista em seção transversal de uma estrutura do revestimento de uma peça estampada de acordo com a invenção;

- a figura 2 mostra uma vista em seção transversal de uma estrutura em camadas do revestimento de uma peça estampada a quente, obtida por um processo não-correspondente à invenção;

- a figura 3 mostra uma vista de topo de uma superfície de um revestimento produzido de acordo com a invenção;

- as figuras 4 e 5 ilustram vistas de topo de revestimentos produzidos em condições que não correspondem à invenção; e

- a figura 6 mostra a natureza do revestimento e a proporção de superfície líquida ao final do período de impregnação, em função da velocidade de aquecimento.

[00018] A invenção é implementada com tiras de aço pré-revestidas, as quais compreendem uma tira ou substrato de aço de base, e um pré-revestimento de liga de alumínio-silício sobre ambos os lados da tira de aço de base.

[00019] O termo "pré-revestimento" se refere à camada de liga de alumínio-silício depositada no substrato, a qual não foi aquecida um pouco antes da etapa de estampagem a quente. Conforme será explicado abaixo, o ciclo de aquecimento da folha pré-revestida de Al-Si

antes da conformação a quente e posterior impregnação sob alta temperatura provoca uma mudança na natureza e morfologia do pré-revestimento, resultante das transformações de fase e da interdifusão com o substrato de aço. Esses mecanismos de transformações e interdifusão proporcionam a formação de um revestimento ótimo na superfície das peças estampadas a quente.

[00020] Os pré-revestimentos com liga de alumínio-silício podem ser obtidos através de contínuos banhos de aluminização a quente, através da imersão da folha de aço em um banho líquido do tipo Al(l) ou Al-Si, contendo 5-11% em peso de Si, 2-4% em peso de Fe, possivelmente, entre 15 e 30 ppm de Ca, e possivelmente, entre 50 e 700 ppm de Sr, o restante sendo de alumínio e impurezas inerentes ao processamento. O silício evita a formação de uma espessa camada intermetálica de ferro metálico, a qual reduz a aderência e a capacidade de conformação. Pré-revestimentos típicos compreendem, partindo do substrato de aço, uma camada interfacial bastante fina (normalmente com menos de 1 micrômetro), com FeAl_3 e Fe_2Al_5 sobre uma camada de fase τ_5 (fase hexagonal do tipo $\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{Al}_{12}$, com concentrações de massa de 29-36% de Fe, 6-12% de Si), normalmente, de 2-7 micrômetros, e sobre uma matriz de Al-Si, incluindo aglomerações de eutéticos Al-Fe-Si (dendritos de Al, Si e τ_6 (fase monoclinica do tipo $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$, com 26-29% de Fe e 13-16% de Si em massa). No entanto, a invenção não está limitada a essas composições.

[00021] A espessura do pré-revestimento de Al-Si é compreendida entre 15 e 50 micrômetros em cada lado. Essa faixa é escolhida de modo a se obter uma ótima formação de liga do pré-revestimento com o substrato de aço, de acordo com uma específica cinética de aquecimento da invenção, que será apresentada abaixo. O pré-revestimento de acordo com a invenção contém mais de 50% de alumínio livre, conforme correlacionado ao alumínio total no pré-revestimento. Se essa

condição não for preenchida, uma alta quantidade de alumínio é ligada como um componente com alto ponto de fusão no pré-revestimento, não existindo a possibilidade de se obter suficiente fusão sob as condições de aquecimento da invenção. Em outras palavras, após a aluminização por imersão a quente, uma suficiente proporção, principalmente, de Al não ligado, isto é, Al não ligado com Fe ou Si, deve estar presente. Um tratamento térmico de formação de liga intermediário após a aluminização por imersão a quente e antes do aquecimento e estampagem a quente, evita a possibilidade da implementação da presente invenção, pelo fato de que esse tratamento pode provocar a formação de produtos intermetálicos com alto ponto de fusão. Assim, um adicional aquecimento antes da estampagem a quente não provocaria uma suficiente quantidade de fusão no revestimento para implementar a invenção.

[00022] Além disso, um adicional tratamento intermediário pode causar a formação de martensita no substrato. Como o corte ou punção das folhas em pedaços de metal laminados deve ser realizado, a martensita tem de ser evitada no substrato de aço, de modo a minimizar o desgaste das ferramentas de corte. Além disso, quando as interfaces de martensita/ferrita estão presentes na microestrutura do substrato, podem ser induzidos danos em volta das bordas de corte, devido às diferentes propriedades intrínsecas desses constituintes.

[00023] A composição do substrato de aço não é crítica, na medida em que a mesma exibe satisfatória capacidade de umedecimento quando a folha é imersa a quente, no banho de alumínio ou liga de alumínio. No entanto, para determinadas aplicações que exigem alta resistência mecânica, como, por exemplo, as partes/peças estruturais dos carros, é preferido que o substrato de aço tenha uma composição que possibilite à peça estampada a quente ser obtida com uma alta resistência, por exemplo, variando de 500 a 1600 MPa, dependendo

das exigências e condições de utilização. Quando níveis mais altos de resistência são almejados, é preferida uma composição de aço compreendendo em peso: $0,15\% < C < 0,5\%$, $0,5\% < Mn < 3\%$, $0,1\% < \text{silício} < 0,5\%$, $0,01\% < Cr < 1\%$, $Ni < 0,1\%$, $Cu < 0,1\%$, $Ti < 0,2\%$, $Al < 0,1\%$, $P < 0,1\%$, $S < 0,05\%$, $0,0005\% < B < 0,08\%$, e contendo ainda ferro e impurezas inerentes do processamento. Um exemplo de um aço disponível comercialmente preferido para uso na tira de aço de base é o aço 22MnB5.

[00024] Quando é desejado um nível de resistência na faixa de 500 MPa na peça estampada a quente, é preferida uma composição de aço compreendendo $0,040\% < C < 0,100\%$, $0,80\% < Mn < 2,00\%$, $Si < 0,30\%$, $S < 0,005\%$, $P < 0,030\%$, $0,010\% \leq Al < 0,070\%$, $0,015\% < Nb < 0,100\%$, $0,030\% < Ti < 0,080\%$, $N < 0,009\%$, $Cu < 0,100\%$, $Ni < 0,100\%$, $Cr < 0,100\%$, $Mo < 0,100\%$, $Ca < 0,006\%$, e ainda contendo ferro e impurezas inerentes do processamento.

[00025] A tira de aço pode ser fabricada em uma instalação de laminação a quente e, opcionalmente, pode ser novamente laminada a frio, dependendo da espessura final desejada. As espessuras podem variar, por exemplo, na faixa entre 0,7 e 3 mm.

[00026] As tiras pré-revestidas são depois cortadas em pedaços de metal laminados pré-revestidos, em vista da seguinte etapa de estampagem a quente.

[00027] Os presentes inventores descobriram que condições específicas de aquecimento e impregnação proporcionam particulares microestrutura e propriedades de revestimento. Essas condições são as seguintes:

- numa primeira etapa, os pedaços de metal laminados devem ser aquecidos sob uma atmosfera não-protetora até uma temperatura intermediária T_i , compreendida entre $T_e - 10^\circ\text{C}$ e T_e . T_e designa a temperatura fracionada do pré-revestimento ou se esse pré-

revestimento se solidifica em um modo eutético, a temperatura eutética. A temperatura T_e pode ser obtida a partir de diagramas de Fe-Al-Si, publicados por V.G. Rivlin, G.V. Raynor: "*Phase equilibria in iron ternary alloys*", Institute of Metals, 1988.

[00028] Alternativamente, T_e pode ser derivada experimentalmente, mediante aquecimento da liga de pré-revestimento, determinando o início da formação de líquido. De acordo com a invenção, o aquecimento é executado até uma temperatura um pouco inferior à temperatura de fusão do pré-revestimento. Assim, por exemplo, no caso de um pré-revestimento de Al-Si compreendendo 5-11% de Si e 2-4% de Fe, a temperatura eutética (T_e) do pré-revestimento é em torno de 577°C e corresponde ao equilíbrio entre o líquido e Al, Si e a fase $T_6(Al_9Fe_2Si_2)$. Essa primeira etapa de aquecimento não é muito crítica, uma vez que ela ocorre em uma faixa de baixa temperatura, quando a cinética de formação de liga é baixa, e uma ampla faixa de velocidades de aquecimento e processos de aquecimento pode ser usada nessa primeira etapa. A primeira etapa de aquecimento pode ser ainda realizada com os mesmos dispositivos de aquecimento da fase seguinte, ou mediante uso de meios ou dispositivos de aquecimento separados.

[00029] A segunda etapa de aquecimento, que se segue imediatamente após a primeira fase, é especialmente importante para controlar a natureza da sequência de transformações no pré-revestimento. Em particular, a velocidade de aquecimento (V) entre a temperatura (T) e uma temperatura de austenitização T_m , deve ser particularmente controlada.

[00030] Primeiramente, a temperatura T_m tem de ser maior que 840°C, para possibilitar a completa transformação da austenita do substrato de aço. Essa temperatura de 840°C torna possível a ocorrência da transformação peritética, e provoca o desaparecimento da fase T_5 no pré-revestimento. No caso de um pré-revestimento de Al-Si

(5-11% de Si, 2-4% de Fe), a temperatura T_m deve ser mais alta que 855°C.

[00031] Mas a temperatura T_m tem de ser limitada para um valor abaixo de 950°C, a fim de prevenir a formação excessiva de óxido de alumínio na superfície do pré-revestimento e/ou, de inaceitável fusão do pré-revestimento. Portanto, a temperatura T_m deve ser compreendida entre 840 e 950°C, ou entre 855 e 950°C, para um pré-revestimento de Al-Si.

[00032] Depois, a velocidade de aquecimento (V) deve ser maior ou igual a 30°C/s; se a velocidade de aquecimento for demasiadamente baixa, uma proporção demasiadamente alta de líquido é formada na superfície do pré-revestimento, no final da etapa de aquecimento e antes da posterior impregnação. Assim, gotas de pré-revestimento são suscetíveis de fluir e de obstruir os laminadores no forno com essa alta proporção de pré-revestimento fundido. Além disso, uma lenta velocidade de aquecimento favorece a formação de um revestimento final composto de 4 ou 5 camadas. Essa disposição de camada é menos favorável do que o revestimento da invenção do ponto de vista de resistência à deformação, uma vez que o aumento das interfaces entre as diferentes fases e o aumento nos gradientes de dureza reduzem a resistência ao fissuramento. O revestimento da invenção não apresenta mais do que três camadas. Embora não correlacionado a qualquer teoria específica, acredita-se que a redução no número de camadas com diferentes propriedades intrínsecas diminui a formação de esforços residuais e, desse modo, a resistência à deformação. Se a velocidade de aquecimento (V) for maior do que 90°C/s, a superfície do pré-revestimento é fundida em grande proporção quando a temperatura T_m é alcançada. A composição é localmente enriquecida de Si e adicional transformação ocorre na forma de um eutético ternário (Al-Si-Fe) com baixo ponto de fusão, de modo que a superfície do pré-revestimento

permanece principalmente líquida durante a impregnação na temperatura T_m . Assim, a superfície do revestimento formado ao final dessa impregnação, resultante da transformação do pré-revestimento é principalmente lisa, apresentando uma fraca aptidão para posterior pintura.

[00033] Quando a velocidade de aquecimento (V) se dispõe entre 30 e 90°C/s, o pré-revestimento é fundido em adequada proporção na sua superfície, e as cinéticas de transformação são aceleradas para tal alta proporção, possibilitando a transformação da fase líquida em produtos intermetálicos à base de Fe e Al. Essa alta cinética de transformação também impede a formação de 4 ou 5 estruturas de camadas no revestimento. Um revestimento mais compacto é produzido com menos camadas estratificadas. Isso proporciona uma vantagem, pelo fato de que são produzidas menos interfaces, o que pode, por sua vez, induzir uma maior resistência mecânica devido ao aumento de homogeneidade. Em particular, o revestimento assim obtido é composto, principalmente, de $FeAl_3$ ou Fe_2Al_5 . Quando a velocidade de aquecimento é compreendida entre 50 e 80°C/s, essa característica de compactação é mais especialmente desenvolvida e uma camada de $FeAl_3$ ou Fe_2Al_5 é para a parte mais presente.

[00034] A figura 6 indica que a faixa específica da velocidade de aquecimento da invenção possibilita obter, simultaneamente, uma proporção de líquido na superfície inferior diferente de 30% ao final da impregnação, e ainda um revestimento não apresentando mais de três camadas.

[00035] A impregnação é realizada à temperatura T_m , durante um período de tempo t_m , compreendido entre 20 e 90 s. Esse período de impregnação possibilita a transformação de uma fração ou da totalidade da fase líquida na superfície do pré-revestimento, em um revestimento tendo uma maior parte de intermetálicos de $FeAl_3$ ou Fe_2Al_5 na

sua superfície. Esse período de impregnação também possibilita a completa transformação do substrato de aço em austenita, e a homogeneização do grão de austenita. Isso, por sua vez, possibilita a obtenção de homogeneidade mecânica na peça final. Esse período de impregnação é mais curto do que de tratamentos usuais, o que, por sua vez, aumenta a produtividade.

[00036] Após o período de impregnação, o pedaço de metal laminado aquecido é transferido do forno para o dispositivo de estampagem a quente. A estampagem a quente é assim realizada para se obter uma peça estampada. O resfriamento pode ser executado no próprio ferramental de estampagem a quente ou, parcialmente, após a estampagem a quente e transferência da peça em um especial dispositivo de resfriamento. A peça é resfriada com uma velocidade de resfriamento escolhida, de acordo com a composição do aço, de modo a se obter martensita ou bainita, ou uma combinação desses constituintes, o que torna possível se obter peças com alta resistência mecânica.

[00037] De acordo com uma modalidade da invenção, a velocidade de aquecimento entre a temperatura T e a temperatura T_m é escolhida, de modo a se obter entre 10 e 60% de fase líquida na superfície do pré-revestimento na temperatura T_m , antes de começar a impregnação; se a proporção de superfície de fase líquida for maior que 60%, o risco de ocorrer obstrução dos laminadores nos fornos se torna importante. Uma proporção mínima de 10% é desejada de ser adaptada à menor espessura (15 micrômetros) do pré-revestimento, na presente invenção. Embora não correlacionado a nenhuma teoria específica, acredita-se que sob essas condições específicas, o pré-revestimento não se funde completamente na sua espessura e devido à tensão superficial do pré-revestimento, as gotas de alumínio líquido são menos suscetíveis de fluir nos laminadores ou suscetíveis de fluir em um nú-

mero limitado de laminadores, devido à proporção muito menor de líquido para ser transformada.

[00038] Assim, o tempo de impregnação em T_m é escolhido, de modo a transformar isotermicamente essa fase líquida, para obtenção de um pedaço de metal laminado aquecido, com um revestimento tendo entre 0 e 30% de fase líquida na sua superfície no final do dito período de impregnação, e cc entre 20 e 50% em peso de Fe na sua superfície. A proporção de líquido na superfície é limitada para 30%, de modo a obter uma superfície áspera na peça final. Um teor de ferro inferior a 20% na superfície do revestimento indica um número insuficiente de cristais intermetálicos na dita superfície do revestimento. Quando o teor de Fe for superior a 50%, a resistência à corrosão da peça estampada tende a ser reduzida.

[00039] O revestimento obtido na peça estampada a quente de acordo com as condições da invenção é composto das seguintes camadas (partindo do substrato de aço):

- uma camada fina de Fe_3Al ;
- sobre essa camada de Fe_3Al , uma camada bastante fina de $FeAl$, ou de fase τ_1 (tipo $Al_3Fe_3Si_2$) ou fase τ_2 (tipo Al_2FeSi), essas fases sendo capazes de coexistir nessa camada. Essas fases contêm Si na solução sólida com menos de 13% em peso na solução sólida;
- uma camada externa composto de mais de 70% de $FeAl$ ou Fe_2Al_5 , essas fases sendo capazes de coexistir. Essas fases intermetálicas contêm Si na solução sólida, com um teor inferior a 6% em peso. Essa camada de $FeAl$ ou Fe_2Al_5 , que constitui a maior parte do revestimento, contém uma fase menor na forma de aglomerações descontínuas de $FeAl$ ou das fases τ_1 ou τ_2 . Essa fase menor contém menos de 13% de Si na solução sólida.

[00040] Propriedades de adesão particularmente satisfatórias são observadas quando essa camada externa é a maior constituinte prin-

cipal do revestimento, isto é, quando a soma das espessuras das camadas de Fe_3Al e FeAl ou das fases de camadas τ_1 ou τ_2 é inferior a $1/3$ da espessura total de revestimento. A espessura total de revestimento na peça estampada varia de 20 a 60 micrômetros. Os presentes inventores descobriram que essa disposição de camadas, em que a camada externa na sua maior parte é composta de fases mais duras do revestimento (FeAl ou Fe_2Al_5) é particularmente favorável, uma vez que essa disposição reduz o coeficiente de atrito na estampagem a quente.

[00041] Além disso, uma excelente aderência à tinta é obtida quando o revestimento exhibe na sua superfície mais de 70% de cristais intermetálicos, esse percentual sendo expresso em proporção por unidade de área.

Exemplos

[00042] Folhas de aço laminadas a frio foram supridas com espessura de 1 e 2 mm, compreendendo, em peso, 0,22% C, 1,2% Mn, 0,2% Si, 0,2% Cr, 0,040% Al, 0,003% B, 0,030% Ti, 0,0002% S, 0,020% P, o restante sendo ferro e impurezas inerentes ao processamento. A microestrutura é composta de ferrita/perlita. Nesse estágio, a ausência de martensita possibilita facilidade nas posteriores etapas de corte, perfuração ou puncionamento das folhas.

[00043] Essas folhas de aço foram pré-revestidas através de imersão contínua da folha em um banho líquido de Al-Si. Um pré-revestimento, de 27 micrômetros de espessura, compreendendo 9% em peso de Si, 3% em peso de Fe, o restante sendo alumínio e impurezas inerentes ao processamento, foi então obtido. Esse pré-revestimento é composto de:

- uma fina camada (menos de 1 micrômetro) de FeAl_3 e Fe_2Al_5 , diretamente em contato com o substrato de aço;
- sobre essa camada, uma camada de fase intermetálica τ_5

com estrutura hexagonal, com espessura de 5 micrômetros;

- sobre essa camada, uma camada não ligada de 21 micrômetros de espessura, com uma matriz de Al-Si com a composição acima. Sua estrutura é composta de dendritos de Al, incluindo Si e Fe na solução sólida e aglomerações de Al-Si eutéticos. Essa camada não ligada ocupa cerca de 80% da espessura do pré-revestimento. Assim, o Al é na maior parte livre no seu pré-revestimento, o que indica a possibilidade de suficiente posterior fusão no tratamento térmico. A temperatura eutética de fusão T_e desse pré-revestimento é de 577°C.

[00044] Em uma condição de teste referida como "B" na Tabela 1 apresentada abaixo, a espessura do pré-revestimento foi de 15 micrômetros.

[00045] As folhas foram cortadas em pedaços de metal laminados que foram aquecidos, estampados a quente e rapidamente resfriados, de modo a obter peças com um substrato de aço totalmente composto de martensita.

[00046] O aquecimento foi realizado sob uma atmosfera não-protetora (usual), mediante uso de diferentes técnicas:

- aquecimento por radiação em um forno de resistência;
- aquecimento em um forno com queimadores a gás;
- aquecimento dentro de um forno de infravermelho;
- aquecimento por indução;
- aquecimento por resistência, onde as folhas foram mantidas dentro de garras condutivas e aquecidas pelo efeito Joule.

[00047] O aquecimento foi realizado até uma temperatura T_i de 575°C (isto é, $T_e - 2^\circ\text{C}$), depois, até uma temperatura T_m , onde a impregnação foi eventualmente executada. A velocidade de aquecimento (V) da temperatura T_i até a temperatura T_m foi controlada.

[00048] A Tabela 1 apresenta os diferentes parâmetros dos testes e

os resultados obtidos. A percentagem da fase líquida na superfície de pré-revestimento após o aquecimento na temperatura T_m e antes da etapa de impregnação foi determinada por exames com um Microscópio de Varredura de Elétrons (SEM), com ampliação de 500X das superfícies das amostras, após a interrupção do resfriamento rápido na temperatura T_m , antes da etapa de impregnação; as áreas com fase líquida que existiam à temperatura T_m são caracterizadas por uma superfície lisa e podem ser distinguidas das fases cristalizadas, as quais apresentam uma aparência áspera (surgimento de cristais simples).

[00049] A proporção de fase líquida após a impregnação foi determinada na peça estampada a quente e resfriada, com similares observações de SEM das superfícies de revestimento, e seguinte quantificação; os revestimentos podem apresentar uma variável fração por unidade de área de líquido no final da etapa de impregnação, a fração restante sendo constituída de fases intermetálicas cristalizadas. Uma alta percentagem de cristais que se elevam na superfície indica uma satisfatória adesão de posteriores tratamentos de pintura (cataforese). Isso é também caracterizado pelo critério de superfície lisa ou uniforme (baixa ou alta aptidão para pintura). O teor de ferro foi medido na superfície do revestimento da peça estampada a quente e resfriada, usando a técnica de difração de raios X com baixo ângulo de incidência. O teor de ferro da fase líquida na superfície do revestimento no final da etapa de impregnação é idêntico ao teor de ferro do revestimento após as posteriores etapas de estampagem a quente e resfriamento.

Tabela 1 – Condições de Teste e Resultados Obtidos.

Teste N°	Natureza [1]	Processo de aquec. [2]	Veloc.aquec. (V) °C/s	T _m (°C)	t _m (s)	(%) Fase líq. na superf. antes im-preg. [3]	(%) Fase líq. na superf. após im-preg. [4]	Teor de Fe na fase líq. [5]	Superf. lisa (S) ou uniforme (U)	Trêscamadas FeAl ₃ ou Fe ₂ Al ₅ na superf. [6]
A	R	RF	<u>3</u>	900	<u>180</u>	<u>100</u>	5	45	U	<u>não</u>
B	R	FB	<u>15</u>	900	<u>0</u>	<u>5</u>	5	43	U	<u>não</u>
C	I	IR	41	900	60	35	5	45	U	sim
D	I	R	50	900	60	50	30	25	U	sim
E	I	R	50	900	60	30	5	45	U	sim
F	R	FB	55	<u>1200</u>	<u>0</u>	<u>70</u>	<u>70</u>	<u>71</u>	<u>S</u>	sim
G	I	IN	58	900	60	40	30	50	U	sim
H	I	R	70	900	60	30	0	45	U	sim
I	I	IN	75	900	60	40	30	50	U	sim
J	R	IN	<u>100</u>	900	60	50	<u>50</u>	<u>>50</u>	<u>S</u>	sim
K	R	IN	<u>100</u>	<u>1000</u>	60	n.d.	<u>70</u>	<u>71</u>	<u>S</u>	n.d.
L	R	R	<u>100</u>	900	60	100	<u>90</u>	<u>>50</u>	<u>S</u>	sim
M	R	IN	<u>115</u>	<u>975</u>	60	n.d.	<u>90</u>	<u>>50</u>	<u>S</u>	n.d.
N	R	IN	<u>180</u>	900	60	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>>50</u>	<u>S</u>	sim
O	I	IR	30	900	90	30	0	43	U	sim
P	I	IR	90	900	20	50	30	30	U	sim
Q	I	FB	90	900	90	60	10	44	U	sim
R	R	IR	30	900	20	30	15	37	U	sim

[00050] Os valores sublinhados indicam condições que não se incluem na invenção. A abreviação (n.d.) significa "não determinado".

[1] Natureza: I = correspondente à invenção; R = Referência;

[2] Processo de aquecimento, para aquecimento de T_1 (575°C) a T_m . FB = Forno com aquecimento de queimadores; IF = Aquecimento por infravermelho; IN = Aquecimento por indução; R = Aquecimento por Resistência (Efeito Joule); RF = Forno aquecido por resistência;

[3] Proporção da fase líquida na superfície do pré-revestimento após aquecimento à temperatura T_m , antes da etapa de impregnação;

[4] Proporção da fase líquida na superfície do revestimento após impregnação à temperatura T_m ;

[5] Teor de ferro (% em peso) na superfície do revestimento;

[6] Caracterização de um revestimento tendo uma estrutura de três camadas com cristais de $FeAl_3$ ou Fe_2Al_5 na sua superfície.

[00051] Os testes C a E, G a I e O a R correspondem às condições da invenção. A figura 1 ilustra um exemplo de revestimento de acordo com a condição de teste H, que corresponde à invenção; partindo do substrato de aço (indicado por (1) na figura 1), o revestimento é composto de uma camada de Fe_3Al , de espessura de 5 micrômetros (indicado pela referência numérica (2)), uma camada bastante fina de $FeAl$ (inferior a 1 micrômetro) (indicada por (3)), com 7% de Si em solução sólida e uma camada externa de 25 micrômetros (indicado por (4)), constituindo mais de 80% da espessura total do revestimento. Essa camada externa é composta de 80% de $FeAl_3$ e 20% de $FeAl$. Essas percentagens se referem à proporção por unidade de área que pode ser medida a partir de análise de imagem em uma microestrutura de

seção transversal do revestimento, de FeAl_3 intermetálico, contendo 3% em peso de Si na solução sólida. O FeAl (indicado por (5) na forma de aglomerações descontínuas, contém 9% de Si na solução sólida. Microestruturas similares são também observadas em outros testes correspondentes às condições da invenção.

[00052] As observações realizadas por Microscópio de Varredura de Elétrons (SEM) (figura 3) indicam uma superfície totalmente coberta por cristais, principalmente, FeAl_3 .

[00053] Para uma velocidade de aquecimento de 3°C/s (teste A) ou de 15°C/s (teste B), a estrutura de revestimento é composta de 5 camadas, conforme ilustrado na figura 2; partindo do substrato (identificado por (6)), o revestimento é composto de uma camada de Fe_3Al (indicado por (7)), e camadas de FeAl (8), FeAl_3 (9), FeAl (10) e FeAl_3 (11). Mesmo que essa disposição de camadas ofereça uma satisfatória soldabilidade, a sua compactação é inferior à descrita pela invenção. Também, deve ser mencionado que o constituinte principal da camada externa (isto é, FeAl_3) é similar na figura 1 e na figura 2, o que também indica estabilidade da faixa de soldagem nas condições da invenção. Entretanto, as condições da invenção possibilitam a obtenção de uma camada compacta, especialmente indicada para as condições de teste D, E, G, H e I.

[00054] Sob as condições da invenção, mais de 70% dos cristais estão presentes na superfície do revestimento, junto com um teor de ferro compreendido entre 20 e 50%, na superfície da camada externa. Isso indica uma satisfatória aptidão para uma posterior pintura.

[00055] O teste B foi realizado com uma velocidade de aquecimento e tempo de impregnação T_m acentuadamente baixos, sobre um pré-revestimento de espessura insuficiente. Como consequência, a proporção de fase líquida no final da etapa de aquecimento é insuficiente e a natureza do revestimento final não corresponde à invenção.

[00056] O teste F foi realizado com uma temperatura T_m acentuadamente alta e um tempo de impregnação acentuadamente curto; assim, o percentual de líquido antes e depois da impregnação é excessivo. Além disso, ocorreu a formação de óxido de alumínio devido à temperatura acentuadamente alta. A sua presença na superfície do revestimento reduz a soldabilidade. Os testes J e N foram aquecidos em velocidades de aquecimento demasiadamente altas, de 100 a 180°C/s. A figura 5 ilustra a superfície obtida no teste N, onde o revestimento é totalmente coberto de líquido após a impregnação na temperatura T_m . Esse revestimento exibe uma aderência bastante baixa para uma posterior cataforese.

[00057] A figura 4 ilustra a superfície obtida no teste L. Mesmo que ocorra uma maior presença de cristais nesse caso, a aderência para pintura é ainda insuficiente.

[00058] Assim, as condições específicas da invenção levam a uma favorável combinação de disposição de camada e uma baixa proporção de líquido por unidade de área no final do período de impregnação, conforme indicado na figura 6. Isso, por sua vez, proporciona uma satisfatória resistência à corrosão e ao desgaste, alta resistência mecânica e satisfatória soldabilidade. Além disso, a produtividade do processo de fabricação é significativamente aumentada, uma vez que as fases de aquecimento e os tempos de impregnação são reduzidos, o que permite o projeto de linhas de estampagem a quente mais compacto. Aproveitando as vantagens de suas características, as peças estampadas a quente, fabricadas de acordo com a invenção, serão usadas vantajosamente na indústria automobilística.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de fabricação de uma peça revestida estampada a quente, caracterizado pelo fato de que compreende as seguintes e sucessivas etapas, na ordem aqui apresentada:

(a) provisão de uma folha de aço laminada a quente ou laminada a frio, que compreende um substrato de aço e um pré-revestimento de liga de alumínio-silício, referido pré-revestimento contendo mais de 50% de alumínio livre e tendo uma espessura selecionada para possibilitar a formação de liga com o referido substrato de aço, dita espessura sendo preferencialmente compreendida entre 15 e 50 micrômetros, depois

(b) corte da referida folha de aço para obtenção de um pedaço de metal laminado de aço pré-revestido; depois

(c) aquecimento do referido pedaço de metal laminado sob uma atmosfera não-protetora, até uma temperatura T_i próxima da temperatura de fusão do referido pré-revestimento, em que a referida temperatura T_i é compreendida entre $T_e - 10^\circ\text{C}$ e T_e , em que T_e é a temperatura eutética ou fracionada do pré-revestimento; em seguida,

(d) aquecimento do referido pedaço de metal laminado da temperatura T_i até uma temperatura de austenização T_m do referido substrato de aço, em que a referida temperatura T_m é compreendida entre 840 e 950°C , sob uma atmosfera não-protetora, com uma velocidade de aquecimento (V) compreendida entre 30°C/s e 90°C/s , (V) sendo a velocidade de aquecimento entre a referida temperatura T_i e referida temperatura T_m , a fim de se obter um pedaço de metal laminado aquecido revestido, depois,

(e) impregnação do referido pedaço de metal laminado aquecido revestido na referida temperatura T_m , por um período de tempo t_m compreendido entre 28s e 90s; depois,

(f) estampagem a quente do referido pedaço de metal lami-

nado, a fim de obter uma peça revestida estampada a quente; depois,

(g) resfriamento da referida peça estampada sob uma velocidade de resfriamento, a fim de formar uma microestrutura no referido substrato de aço, que compreende pelo menos um constituinte escolhido entre martensita ou bainita.

2. Processo de fabricação de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a referida velocidade de aquecimento (V), entre as referidas temperaturas T_i e T_m é compreendida entre 50 e 80°C/s.

3. Processo de fabricação de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que o referido pré-revestimento compreende de 5-11% em peso de Si, 2-4% em peso de Fe, opcionalmente, entre 15 e 30 ppm de Ca, entre 50 e 700 ppm de Sr, o restante sendo Al e impurezas inerentes ao processamento, a referida temperatura T_i sendo compreendida entre 567 e 577°C e a referida temperatura T_m sendo compreendida entre 855 e 950°C.

4. Processo de fabricação de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a referida espessura do pré-revestimento é compreendida entre 15 e 50 micrômetros.

5. Processo de fabricação de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que o referido aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aquecimento por indução.

6. Processo de fabricação de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que o referido aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aquecimento por resistência.

7. Processo de fabricação de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato de que o referido aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de aque-

cimento por infravermelho.

8. Processo de fabricação de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 7, caracterizado pelo fato de que o referido aquecimento é realizado, pelo menos parcialmente, através de queimadores a gás.

9. Processo de fabricação de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que a espessura total do referido revestimento da peça revestida estampada a quente é compreendida entre 20 e 60 micrômetros.

10. Peça revestida estampada a quente, caracterizada pelo fato de que compreende um substrato de aço que possui uma microestrutura que compreende pelo menos um constituinte escolhido entre bainita ou martensita, e um revestimento sobre cada um dos dois lados do referido substrato, o referido revestimento sendo composto das seguintes camadas contendo Si na solução sólida, partindo da camada contígua ao referido substrato de aço:

(a) uma camada de Fe_3Al ;

(b) uma camada de FeAl ou camada de fases τ_1 (tipo $\text{Al}_3\text{Fe}_3\text{Si}_2$) ou τ_2 (tipo Al_2FeSi) sobre a referida camada de Fe_3Al ;

(c) uma camada externa composta de mais de 70% de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 , dita camada de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 contendo uma fase menos descontínua de FeAl , ou fases de τ_1 ou τ_2 , dita camada externa tendo mais de 70% de cristais na sua superfície,

em que as referidas camadas de FeAl ou de τ_1 ou τ_2 sobre a referida camada de Fe_3Al , apresenta menos de 13% de Si na solução sólida, em que as referidas camadas de FeAl_3 ou Fe_2Al_5 na referida camada externa apresentam menos de 6% de Si na solução sólida, e em que a referida fase menos descontínua de FeAl ou de τ_1 ou τ_2 , apresenta menos de 13% de Si na solução sólida

em que a soma da espessura da referida camada de Fe_3Al

e a referida camada de FeAl, ou da camada de fases T_1 ou T_2 , é menor que 1/3 da espessura total do referido revestimento.

11. Peça revestida estampada a quente de acordo com a reivindicação 10, caracterizada pelo fato de que a espessura do referido revestimento em cada um dos referidos lados é compreendida entre 20 e 60 micrômetros.

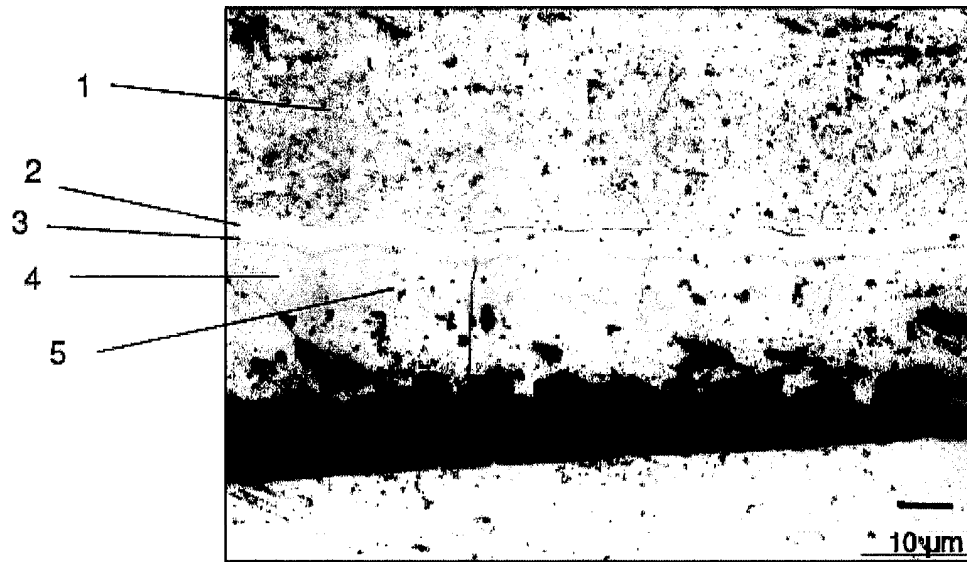


FIG. 1

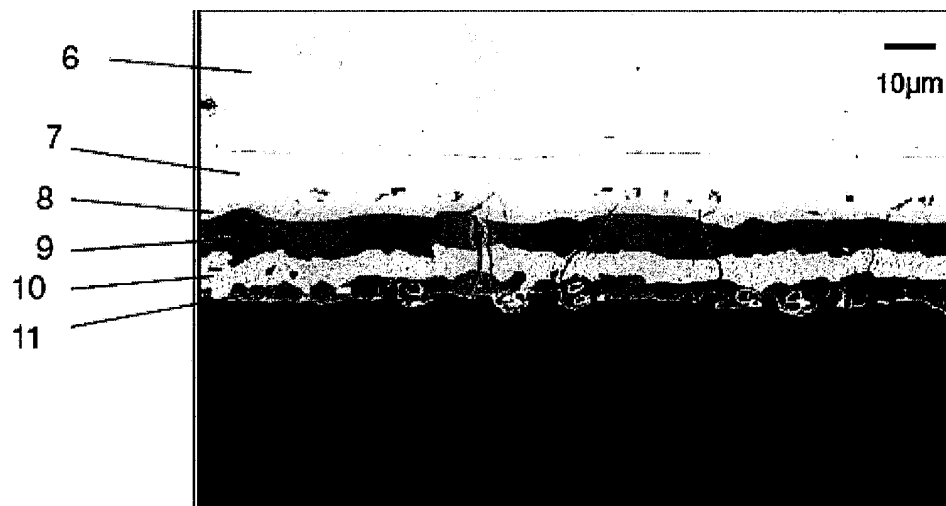


FIG. 2

FIG. 3

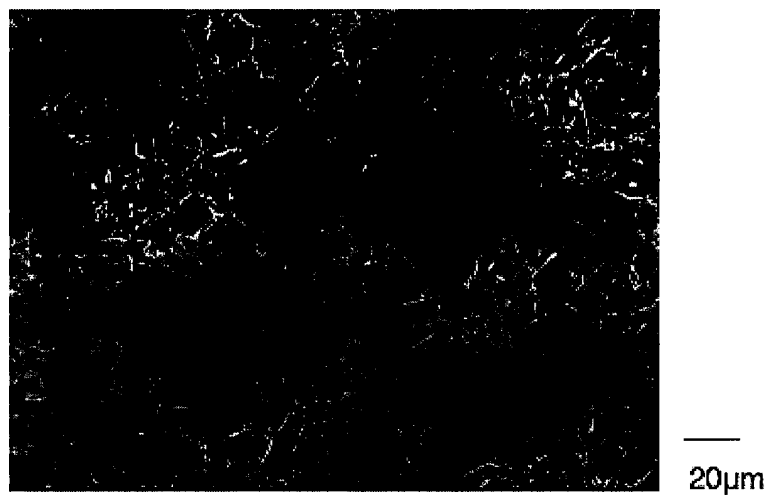


FIG. 4

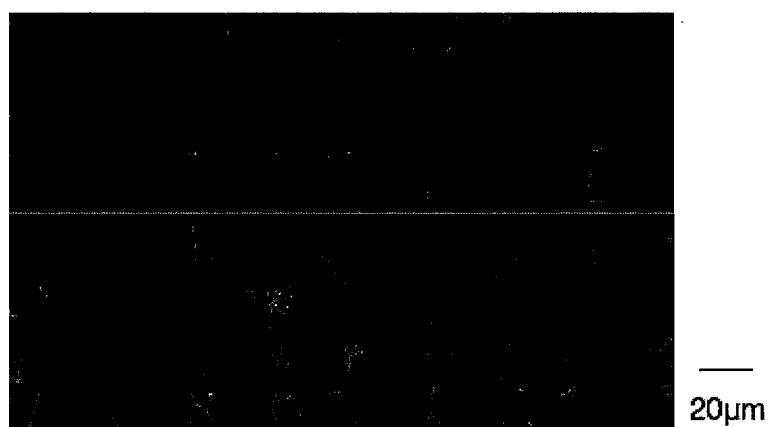


FIG. 5



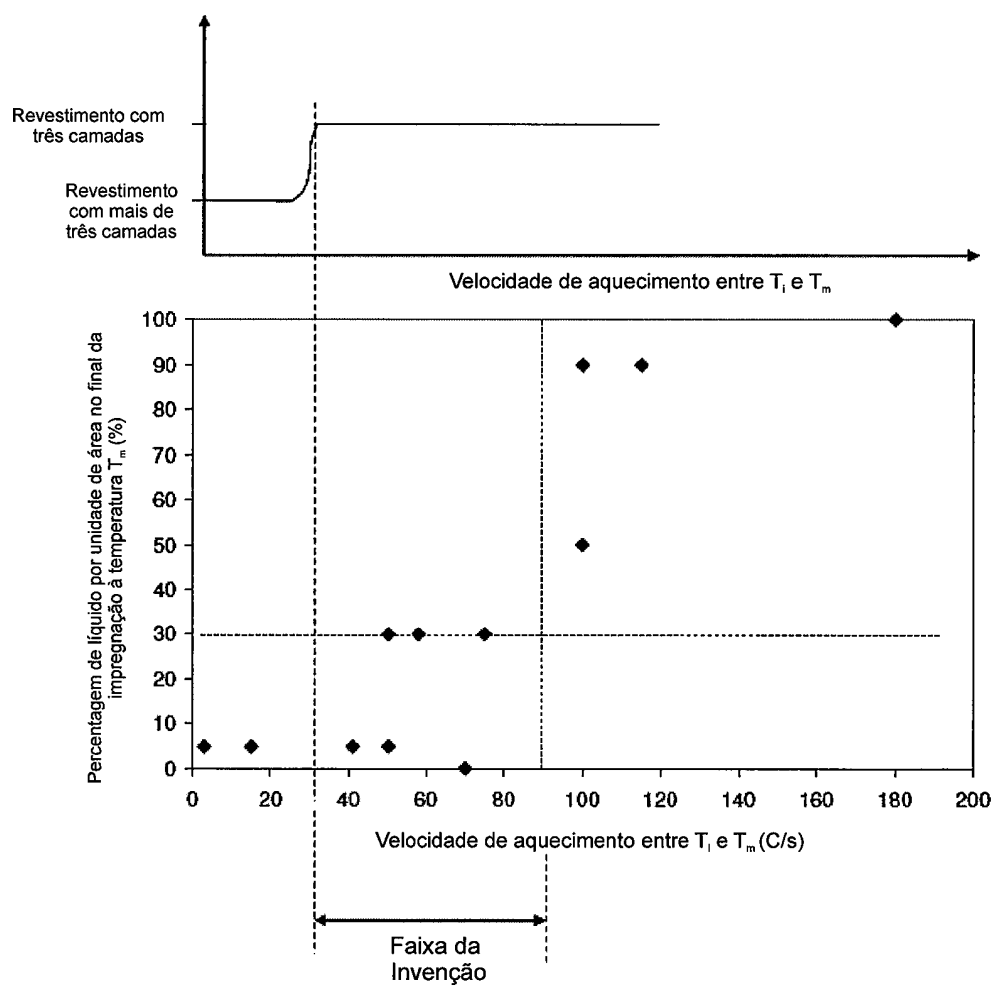


FIG. 6