



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

**(11) BR 112012016546-1 B1**

**(22) Data do Depósito:** 29/12/2010

**(45) Data de Concessão:** 10/07/2018



\* B R 1 1 2 0 1 2 0 1 6 5 4 6 B

---

**(54) Título:** MÉTODOS PARA AUMENTAR A RESISTÊNCIA E A TENACIDADE DE UMA LIGA DE TITÂNIO, TRATAR TERMOMECHANICAMENTE LIGAS DE TITÂNIO E PROCESSAR LIGAS DE TITÂNIO

**(51) Int.Cl.:** C22C 14/00; C22F 1/18

**(30) Prioridade Unionista:** 22/01/2010 US 12/691,952

**(73) Titular(es):** ATI PROPERTIES LLC

**(72) Inventor(es):** DAVID J. BRYAN

“MÉTODOS PARA AUMENTAR A RESISTÊNCIA E A TENACIDADE DE UMA LIGA DE TITÂNIO, TRATAR TERMOMECHANICAMENTE LIGAS DE TITÂNIO E PROCESSAR LIGAS DE TITÂNIO”

Fundamentos da Tecnologia

Campo da Tecnologia

[001] A presente divulgação é dirigida a métodos para a produção de ligas de titânio com alta resistência e alta tenacidade. Os métodos de acordo com a presente divulgação não requerem os tratamentos de calor de multietapas usados em determinados métodos de produção de ligas de titânio existentes.

Descrição dos Fundamentos da Tecnologia

[002] As ligas de titânio exibem tipicamente uma alta razão de resistência para peso, são resistentes à corrosão, e são resistentes à deformação a temperaturas moderadamente altas. Por estas razões, as ligas de titânio são usadas em aplicações aeroespaciais e aeronáuticas, incluindo, por exemplo, peças estruturais críticas, tais como membros do trem de pouso e quadros do motor. Ligas de titânio também são usadas em motores a jato para peças, tal como rotores, lâminas de compressor, peças de sistema hidráulico e nacelas.

[003] O titânio puro sofre uma transformação de fase alotrópica em cerca de 882°C. Abaixo desta temperatura, o titânio adota uma estrutura cristalina empacotada próxima da forma hexagonal, referida como a fase  $\alpha$ . Acima desta temperatura, o titânio tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, referida como a fase  $\beta$ . A temperatura à qual a transformação da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$  ocorre é referida como a temperatura beta transus ( $T_\beta$ ). A temperatura beta transus é afetada por elementos intersticiais e substitucionais e, portanto, é dependente de impurezas e, mais importantemente, elementos de liga.

[004] Em ligas de titânio, os elementos de liga são geralmente classificados como elementos de estabilização  $\alpha$  ou elementos de estabilização  $\beta$ . A adição de elementos de estabilização  $\alpha$  (“estabilizadores  $\alpha$ ”) para titânio aumenta a temperatura beta transus. O alumínio, por exemplo, é um elemento de substituição para o titânio e é um  $\alpha$  estabilizador. Os elementos de liga intersticiais para titânio que são estabilizadores  $\alpha$  incluem, por exemplo, oxigênio, nitrogênio e carbono.

[005] A adição de elementos de estabilização  $\beta$  para titânio diminui a temperatura beta transus. Os elementos de estabilização  $\beta$  podem ser tanto elementos  $\beta$  isomórficos ou

elementos  $\beta$  eutetóides, dependendo dos diagramas de fase resultantes. Exemplos de elementos de liga  $\beta$  isomórficos para titânio são vanádio, molibdênio e nióbio. Ao ligar com concentrações suficientes destes elementos de liga  $\beta$  isomórficos, é possível reduzir a temperatura beta transus até à temperatura ambiente ou inferior. Exemplos de elementos de liga  $\beta$  eutetóides são cromo e ferro. Além disso, outros elementos, tais como, por exemplo, silício, zircônio, e háfnio são neutros no sentido de que estes elementos têm pouco efeito sobre a temperatura beta transus de titânio e ligas de titânio.

[006] A FIG. 1A representa um diagrama de fases esquemático que mostra o efeito da adição de um estabilizador  $\alpha$  para titânio. Na medida em que a concentração do estabilizador  $\alpha$  aumenta, a temperatura beta transus também aumenta, o que é visto pela inclinação positiva da linha da temperatura beta transus 10. O campo de fase beta 12 encontra-se acima da linha de temperatura beta transus 10 e é uma área do diagrama de fases onde apenas a fase  $\beta$  está presente na liga de titânio. Na FIG. 1A, um campo de fase alfa-beta 14 encontra-se abaixo da linha de temperatura beta transus 10 e representa uma área no diagrama de fases, onde tanto a fase  $\alpha$  quanto a fase  $\beta$  ( $\alpha + \beta$ ) estão presentes na liga de titânio. Abaixo do campo de fase alfa-beta 14 está o campo de fase alfa 16, onde apenas a fase  $\alpha$  está presente na liga de titânio.

[007] A FIG. 1B representa um diagrama de fases esquemático mostrando o efeito da adição de um estabilizador  $\beta$  isomórfico para o titânio. Concentrações mais altas de estabilizadores  $\beta$  reduzem a temperatura beta transus, como é indicado pela inclinação negativa da linha de temperatura beta transus 10. Acima da linha de temperatura beta transus 10 está o campo de fase beta 12. Um campo de fase alfa-beta 14 e um campo de fase alfa 16 também estão presentes no diagrama de fases esquemático de titânio com o estabilizador  $\beta$  isomórfico na FIG. 1B.

[008] A FIG. 1C representa um diagrama de fases esquemático que mostra o efeito da adição de um estabilizador  $\beta$  eutetóide para titânio. O diagrama de fases apresenta um campo de fase beta 12, uma linha de temperatura beta transus 10, um campo de fase alfa-beta 14, e um campo de fase alfa 16. Além disso, existem dois campos de duas fases adicionais no diagrama de fases da FIG. 1C, que contêm tanto a fase  $\alpha$  quanto a fase  $\beta$  juntamente com o produto da reação de titânio e o  $\beta$  eutetóide de estabilização de adição de liga (Z).

[009] As ligas de titânio são geralmente classificadas de acordo com a sua composição química e sua microestrutura à temperatura ambiente. O titânio comercialmente puro (CP) e as ligas de titânio que contêm apenas estabilizadores  $\alpha$ , tais como o alumínio, são considerados ligas alfa. Estes são predominantemente ligas de fase única que consistem essencialmente na fase  $\alpha$ . No entanto, o titânio CP e outras ligas alfa, depois de serem recozidos abaixo da temperatura beta transus, contêm geralmente cerca de 2-5 por cento em volume de fase  $\beta$ , que é tipicamente estabilizada por impurezas de ferro na liga de titânio alfa. O pequeno volume de fase  $\beta$  é usado na liga para controlar o tamanho de grão da fase  $\alpha$  recristalizada.

[0010] As ligas de titânio próximas de alfa possuem uma quantidade pequena de fase  $\beta$ , geralmente menos de 10 por cento em volume, o que resulta em resistência à tensão à temperatura ambiente aumentada e na resistência à deformação aumentada a temperaturas de uso acima de 400°C, em comparação com as ligas alfa. Uma liga de titânio próximo de alfa exemplar pode conter cerca de 1 por cento em peso de molibdênio.

[0011] As ligas de titânio alfa/beta ( $\alpha + \beta$ ), tais como liga Ti-6Al-4V (Ti 6-4) e liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2), contêm tanto fase alfa quanto beta e são amplamente usadas na indústria aeroespacial e aeronáutica. A microestrutura e propriedades de ligas alfa/beta podem ser variadas através de tratamentos de calor e de processamento termomecânico.

[0012] As ligas de titânio beta estáveis, ligas de titânio beta metaestáveis e ligas de titânio próximo de beta, coletivamente classificadas como “ligas beta”, contêm substancialmente mais elementos de estabilização  $\beta$  do que ligas alfa/beta. As ligas de titânio próximas de beta, tais como, por exemplo, liga Ti-10V-2Fe-3AL, contêm quantidades de elementos de estabilização  $\beta$  suficientes para manter uma estrutura de fase  $\beta$  no todo quando a água é resfriada bruscamente, mas não quando o ar é resfriada bruscamente. As ligas de titânio beta metaestáveis, tais como, por exemplo, liga de Ti-15Mo, contêm níveis mais elevados de estabilizadores  $\beta$  e retêm uma estrutura de fase toda  $\beta$  mediante resfriamento ao ar, mas podem ser envelhecidas para precipitar a fase  $\alpha$  para resistência. As ligas de titânio beta estáveis, tais como, por exemplo, liga de Ti-30Mo, retêm uma microestrutura de fase toda  $\beta$  mediante resfriamento, mas não podem ser envelhecidas para precipitar a fase  $\alpha$ .

[0013] Sabe-se que as ligas alfa/beta são sensíveis a taxas de resfriamento quando resfriadas acima da temperatura beta transus. A precipitação da fase  $\alpha$  em limites de grãos

durante o resfriamento reduz a tenacidade destas ligas. Atualmente, a produção de ligas de titânio com alta resistência e elevada tenacidade requer o uso de uma combinação de deformações de alta temperatura, seguido por um tratamento térmico de multietapas complicado que inclui envelhecimento direto e taxas de aquecimento cuidadosamente controladas. Por exemplo, a Publicação de Pedido de Patente US 2004/0250932 A1 divulga a formação de uma liga de titânio que contém pelo menos 5% de molibdênio em uma forma útil a uma primeira temperatura acima da temperatura beta transus, ou o tratamento térmico de uma liga de titânio a uma primeira temperatura acima da temperatura beta transus seguido por resfriamento controlado, a uma taxa de não mais que 5°F (2,8°C) por minuto para uma segunda temperatura abaixo da temperatura beta transus. A liga de titânio também pode ser tratada termicamente a uma terceira temperatura.

[0014] Um gráfico esquemático da temperatura versus tempo de um método típico do estado da técnica para a produção de ligas de titânio duras, de alta resistência é mostrado na FIG. 2. O método inclui geralmente uma etapa de deformação de temperatura elevada conduzida abaixo da temperatura beta transus, e uma etapa de tratamento térmico, incluindo o aquecimento acima da temperatura beta transus seguido por resfriamento controlado. As etapas de processamento termomecânicas do estado da técnica usadas para produzir as ligas de titânio tendo tanto alta resistência quanto alta tenacidade são caras e, atualmente, apenas um número limitado de fabricantes tem a capacidade de realizar estas etapas. Portanto, seria vantajoso fornecer um processo melhorado para aumentar a resistência e/ou a tenacidade das ligas de titânio.

#### Sumário

[0015] De acordo com um aspecto da presente divulgação, uma modalidade não limitativa de um método para aumentar a resistência e a tenacidade de uma liga de titânio inclui deformar plasticamente uma liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa-beta da liga de titânio para uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% em área. Após deformar plasticamente a liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa-beta, a liga de titânio não é aquecida a uma temperatura igual ou acima de uma temperatura beta transus da liga de titânio. Ainda de acordo com a modalidade não limitativa, após deformar plasticamente a liga de titânio, a liga de titânio é tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico menor ou igual à temperatura beta transus

menos 20°F por um tempo de tratamento térmico suficiente para produzir uma liga tratada termicamente tendo uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ . Em outra modalidade não limitativa, a liga de titânio pode ser tratada termicamente após a deformação plástica a uma temperatura no campo de fase alfa-beta da liga de titânio a uma deformação plástica equivalente de pelo menos 25% de redução em área a uma temperatura de tratamento térmico menor ou igual à temperatura beta transus menos 20°F por um tempo de tratamento térmico suficiente para produzir uma liga tratada termicamente tendo uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ .

[0016] De acordo com um outro aspecto da presente divulgação, um método não limitativo para tratar termomecanicamente uma liga de titânio inclui trabalhar uma liga de titânio em uma faixa de temperatura de trabalho de 200°F (111°C) acima da temperatura beta transus da liga de titânio a 222°C abaixo da temperatura beta transus. Em uma modalidade não limitativa, na conclusão da etapa de trabalho uma deformação plástica equivalente de pelo menos 25% de redução na área pode ocorrer em um campo de fase alfa-beta da liga de titânio, e a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus após a deformação plástica equivalente de pelo menos 25% de redução na área do campo de fase alfa beta da liga de titânio. De acordo com uma modalidade não limitante, depois de trabalhar a liga de titânio, a liga pode ser tratada termicamente em faixa de temperatura de tratamento térmico entre 1500°F (816°C) e 900°F (482°C) durante um tempo de tratamento térmico de entre 0,5 e 24 horas. A liga de titânio pode ser tratada termicamente em uma faixa de temperatura de tratamento térmico entre 1500°F (816°C) e 900°F (482°C) por um tempo de tratamento térmico suficiente para produzir uma liga tratada termicamente ter uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$  ou, em uma outra modalidade não limitativa, de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ .

[0017] De acordo com ainda outro aspecto da presente divulgação, uma modalidade não limitativa de um método para processamento de ligas de titânio compreende trabalhar uma liga de titânio em um campo de fase alfa beta da liga de titânio para fornecer uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% em área da liga de

titânio. Em uma modalidade não limitativa do método, a liga de titânio é capaz de reter a fase beta à temperatura ambiente. Em uma modalidade não limitativa, depois de trabalhar a liga de titânio, a liga de titânio pode ser tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico não maior do que a temperatura beta transus menos 20°F por um tempo de tratamento térmico suficiente para fornecer a liga de titânio com uma resistência à tensão final média de pelo menos 150 ksi e uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos 70 ksi • in<sup>1/2</sup>. Em uma modalidade não limitativa, o tempo de tratamento térmico está na faixa de 0,5 hora a 24 horas.

[0018] No entanto, um aspecto adicional da presente divulgação é dirigido para uma liga de titânio que foi processada de acordo com um método englobado pela presente divulgação. Uma modalidade não limitativa é dirigida para uma liga de Ti-5Al-5V-5Mo-3CR que foi processada por um método de acordo com a presente divulgação, incluindo as etapas de deformar plasticamente e tratar termicamente a liga de titânio, e em que a liga tratada termicamente tem uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ . Como é conhecido na técnica, a liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, que também é conhecida como liga Ti-5553 ou liga Ti 5-5-5-3, inclui nominalmente 5 por cento em peso de alumínio, 5 por cento em peso de vanádio, 5 por cento em peso de molibdênio, 3 por cento em peso de cromo e equilíbrio de titânio e impurezas acidentais. Em uma modalidade não limitativa, a liga de titânio é deformada plasticamente a uma temperatura no campo de fase alfa beta da liga de titânio a uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% em área. Após deformar plasticamente a liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa beta, a liga de titânio não é aquecida a uma temperatura igual ou acima de uma temperatura beta transus da liga de titânio. Além disso, em uma modalidade não limitativa, a liga de titânio é tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico menor ou igual à temperatura beta transus menos 20°F (11,1 °C) por um tempo de tratamento térmico suficiente para produzir uma liga tratada termicamente com uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ .

[0019] Ainda outro aspecto de acordo com a presente divulgação é dirigido a um artigo adaptado para uso em pelo menos uma de uma aplicação aeronáutica e uma aplicação

aeroespacial e constituído por uma liga de Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr que foi processado por um método incluindo deformar plasticamente e tratar termicamente a liga de titânio de uma maneira suficiente para que uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente esteja relacionada com uma resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ . Em uma modalidade não limitativa, a liga de titânio pode ser deformada plasticamente a uma temperatura no campo de fase alfa beta da liga de titânio a uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% em área. Após plasticamente deformar a liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa beta, a liga de titânio não é aquecida a uma temperatura igual ou acima de uma temperatura beta transus da liga de titânio. Em uma modalidade não limitativa, a liga de titânio pode ser tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico menor a ou igual a (isto é, não maior que) a temperatura beta transus menos 20°F (11,1 °C) por um tempo de tratamento térmico suficiente para produzir uma liga tratada termicamente tendo uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ .

#### Breve Descrição dos Desenhos

[0020] As características e vantagens dos métodos descritos aqui podem ser mais bem compreendidas por referência aos desenhos anexos nos quais:

[0021] A FIG. 1A é um exemplo de um diagrama de fases para o titânio de liga com um elemento de estabilização alfa;

[0022] A FIG. 1B é um exemplo de um diagrama de fases para o titânio de liga com um elemento de estabilização beta isomórfica;

[0023] A FIG. 1C é um exemplo de um diagrama de fases para o titânio de liga com um elemento de estabilização beta eutetóide;

[0024] A FIG. 2 é uma representação esquemática de um esquema de processamento termomecânico do estado da técnica para a produção de ligas de titânio de alta resistência, duras;

[0025] A FIG. 3 é um diagrama de tempo-temperatura de uma modalidade não limitativa de um método de acordo com a presente divulgação compreendendo substancialmente toda a deformação plástica de fase alfa-beta;

[0026] A FIG. 4 é um diagrama de tempo-temperatura de outra modalidade não limi-



tativa de um método de acordo com a presente divulgação compreendendo deformação plástica “através de transus beta”;

[0027] A FIG. 5 é um gráfico de tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  versus resistência ao escoamento para várias ligas de titânio tratadas por calor de acordo com processos do estado da técnica;

[0028] A FIG. 6 é um gráfico de tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  versus resistência ao escoamento para as ligas de titânio que foram deformadas plasticamente e tratadas por calor de acordo com modalidades não limitativas de um método de acordo com a presente divulgação e comparação dessas modalidades com ligas tratadas por calor de acordo com processos do estado da técnica;

[0029] A FIG. 7A é uma micrografia de uma liga de Ti 5-5-5-3 na direção longitudinal após a laminagem e tratamento térmico a 1250°F (677°C) durante 4 horas, e

[0030] A FIG. 7B é uma micrografia de uma liga de Ti 5-5-5-3 na direção transversal após a laminagem e tratamento térmico a 1250°F (677°C) durante 4 horas.

[0031] O leitor irá apreciar os detalhes precedentes, assim como outros, ao considerar a seguinte descrição detalhada de certas modalidades não limitativas de métodos de acordo com a presente divulgação.

#### Descrição Detalhada de Certas Modalidades Não Limitativas

[0032] Na presente descrição de modalidades não limitativas, exceto nos exemplos de funcionamento ou quando indicado em contrário, todos os números que expressam quantidades ou características devem ser entendidos como sendo modificados em todos os casos pelo termo “cerca de”. Por conseguinte, a menos que indicado em contrário, quaisquer parâmetros numéricos constantes da descrição que segue são aproximações que podem variar dependendo das propriedades desejadas que se procura obter nos métodos para a produção de ligas de titânio de alta resistência, alta tenacidade de acordo com a presente divulgação. No mínimo, e não como uma tentativa de limitar a aplicação da doutrina dos equivalentes para o escopo das reivindicações, cada parâmetro numérico deve pelo menos ser interpretado em função do número de algarismos significativos relatados e pela aplicação de técnicas de arredondamento comuns.

[0033] Qualquer patente, publicação, ou outro material de divulgação que é dito ser incorporado, no todo ou em parte, por referência aqui é incorporado aqui apenas na medida

em que o material incorporado não entre em conflito com as definições existentes, declarações, ou outro material de divulgação estabelecido nesta divulgação. Como tal, e na medida do necessário, a divulgação como estabelecida aqui substitui qualquer material em conflito incorporado aqui por referência. Qualquer material, ou porção do mesmo, que é dito ser incorporado por referência aqui, mas que entra em conflito com as definições existentes, declarações, ou outro material de divulgação estabelecido aqui é apenas incorporado na medida em que não surja qualquer conflito entre o material incorporado e o material de divulgação existente.

[0034] Certas modalidades não limitativas de acordo com a presente divulgação são dirigidas a métodos termomecânicos para a produção de ligas de titânio de alta resistência e duras que não requerem o uso de tratamentos de calor de multietapas, complicado. Surpreendentemente, e em contraste com os complexos processos termomecânicos presentemente e historicamente usados com ligas de titânio, certas modalidades não limitativas dos métodos termomecânicos divulgados aqui incluem apenas uma etapa de deformação a alta temperatura seguida por um tratamento térmico de uma etapa para conferir às ligas de titânio combinações de resistência à tensão, ductilidade e tenacidade à fratura, requeridas em certos materiais aeroespaciais e aeronáuticos. Prevê-se que as modalidades do processamento termomecânico dentro da presente divulgação podem ser conduzidas em qualquer instalação que é razoavelmente bem equipada para realizar o tratamento térmico termomecânico de titânio. As modalidades contrastam com as práticas convencionais de tratamento térmico para conferir alta tenacidade e alta resistência para as ligas de titânio, práticas que comumente requerem equipamento sofisticado para controlar estreitamente as taxas de resfriamento da liga.

[0035] Com referência ao gráfico esquemático de temperatura versus de tempo da FIG. 3, um método não limitativo 20 de acordo com a presente divulgação para aumentar a resistência e a tenacidade de uma liga de titânio compreende deformar plasticamente 22 uma liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa-beta da liga de titânio para uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% em área. (Ver FIGS. 1A-1C e a discussão acima em relação ao campo de fase alfa-beta de uma liga de titânio.) A deformação plástica de 25% equivalente no campo de fase alfa-beta envolve uma temperatura de deformação plástica final 24 no campo de fase alfa-beta. O termo “tempera-

tura de deformação plástica final” é definido aqui como a temperatura da liga de titânio na conclusão da deformação de forma plástica da liga de titânio e antes do envelhecimento da liga de titânio. Tal como será mostrado na FIG. 3, subsequente à deformação plástica 22, a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus ( $T_\beta$ ) da liga de titânio durante o método 20. Em certas modalidades não limitativas e como mostrado na FIG. 3 subsequente à deformação plástica à temperatura de deformação plástica final 24, a liga de titânio é tratada termicamente 26 a uma temperatura abaixo da temperatura beta transus durante um tempo suficiente para conferir alta resistência e alta tenacidade à fratura para a liga de titânio. Em uma modalidade não limitativa, o tratamento térmico 26 pode ser conduzido a uma temperatura de pelo menos 20°F abaixo da temperatura beta transus. Em outra modalidade não limitativa, o tratamento térmico 26 pode ser conduzido a uma temperatura de pelo menos 50°F abaixo da temperatura beta transus. Em certas modalidades não limitativas, a temperatura de tratamento térmico 26 pode ser abaixo da temperatura de deformação plástica final 24. Em outras modalidades não limitativas, não mostrado na FIG. 3, a fim de aumentar ainda mais a tenacidade à fratura da liga de titânio, a temperatura do tratamento térmico pode ser superior à temperatura de deformação plástica final, mas inferior à temperatura beta transus. Será entendido que, embora a FIG. 3 mostre uma temperatura constante para a deformação plástica 22 e o tratamento térmico 26, em outras modalidades não limitativas de um método de acordo com a presente divulgação a temperatura da deformação plástica 22 e/ou tratamento térmico 26 pode variar. Por exemplo, uma diminuição natural na temperatura da peça de trabalho de liga de titânio que ocorre durante a deformação plástica está dentro do escopo das modalidades divulgadas aqui. O gráfico esquemático de temperatura - tempo da FIG. 3 ilustra que certas modalidades de métodos de tratamento térmico de ligas de titânio que conferem alta resistência e alta tenacidade divulgadas aqui contrastam com as práticas convencionais de tratamento térmico que conferem alta resistência e alta tenacidade para ligas de titânio. Por exemplo, as práticas de tratamento térmico convencionais tipicamente requerem tratamentos térmicos de multietapas e equipamento sofisticado para controlar estreitamente as taxas de resfriamento de liga e são, portanto, caras e não podem ser praticadas em todas as instalações de tratamento térmico. As modalidades do processo ilustradas pela FIG. 3, no entanto, não envolvem múltiplas etapas de tratamento térmico e podem ser conduzidas usando equipamento de tratamento térmico

convencional.

[0036] Geralmente, a composição de liga de titânio específica determina a combinação de tempo(s) de tratamento térmico e temperatura(s) de tratamento térmico que vai conferir as propriedades mecânicas desejadas usando métodos de acordo com a presente divulgação. Além disso, os tempos e as temperaturas de tratamento térmico podem ser ajustados para obter um equilíbrio desejado específico de tenacidade à fratura e resistência por uma composição de liga particular. Em certas modalidades não limitativas aqui divulgadas, por exemplo, através do ajuste dos tempos de tratamento térmico e das temperaturas usadas para processar uma liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3) por um método de acordo com a presente divulgação, as resistências à tensão finais de 140 ksi a 180 ksi combinadas com níveis de tenacidade à fratura de  $60 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$   $K_{Ic}$  para  $100 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$   $K_{Ic}$  foram alcançadas. Ao considerar a presente divulgação, os versados na técnica, podem, sem esforço indevido, determinar a(s) combinação(ões) particular(es) de tempo e temperatura de tratamento térmico que irá(ão) conferir as propriedades de resistência e tenacidade ótimas para uma liga de titânio particular para a sua aplicação pretendida.

[0037] O termo “deformação plástica” é usado aqui para significar a distorção inelástica de um material mediante estresse ou estresses aplicados que esticam o material para além do seu limite elástico.

[0038] O termo “redução na área” é usado aqui para significar a diferença entre a área em seção transversal de uma forma de liga de titânio antes da deformação plástica e a área da seção transversal da forma de liga de titânio após a deformação plástica, em que a seção transversal é tomada em um local equivalente. A forma de liga de titânio usada na avaliação da redução na área pode ser, mas não está limitada a, qualquer de um lingote, uma barra, uma placa, uma haste, uma bobina, uma folha, uma forma laminada, e uma forma extrudada.

[0039] Um exemplo de uma redução no cálculo da área para deformar plasticamente um lingote de liga de titânio redondo de 5 polegadas de diâmetro rolando o lingote para uma barra de liga de titânio de 2,5 polegadas redonda segue. A área em seção transversal de um lingote redondo de 5 polegadas de diâmetro é  $\pi$  (pi) vezes o quadrado do raio, ou aproximadamente  $(3,1415) \times (2,5 \text{ polegadas})^2$ , ou  $19,625 \text{ in}^2$ . A área em seção transversal de uma barra redonda de 2,5 polegadas é aproximadamente  $(3,1415) \times (1,25)^2$ , ou  $4,91 \text{ in}^2$ .

A razão da área de seção transversal do lingote de partida para a barra depois da laminação é  $4,91 / 19,625$ , ou 25%. A redução na área é de  $100\% - 25\%$ , para uma redução de 75% em área.

[0040] O termo “deformação plástica equivalente” é usado aqui para significar a distorção inelástica de um material mediante estresses aplicados que esticam o material para além do seu limite elástico. A deformação plástica equivalente pode envolver estresses que resultariam na redução especificada na área obtida com a deformação uniaxial, mas ocorre de tal modo que as dimensões da liga que se formam após a deformação não são substancialmente diferentes das dimensões da liga que se formam antes da deformação. Por exemplo, e sem limitação, o forjamento de multieixos pode ser usado para submeter um lingote de liga de titânio forjado achatado para a deformação plástica substancial, introduzindo deslocamentos na liga, mas sem alterar substancialmente as dimensões finais do lingote. Em uma modalidade não limitativa, em que a deformação plástica equivalente é pelo menos 25%, a redução real na área pode ser de 5% ou menos. Em uma modalidade não limitativa, em que a deformação plástica equivalente é pelo menos 25%, a redução real na área pode ser de 1% ou menos. O forjamento multieixo é uma técnica conhecida por uma pessoa versada na técnica e, por conseguinte, não é adicionalmente descrita aqui.

[0041] Em certas modalidades não limitativas de acordo com a presente divulgação, uma liga de titânio pode ser deformada plasticamente para uma deformação plástica equivalente de mais que uma redução de 25% na área e até uma redução de 99% na área. Em certas modalidades não limitativas em que a deformação plástica equivalente é maior que uma redução de 25% na área, pelo menos uma deformação plástica equivalente de uma redução de 25% na área no campo de fase alfa-beta ocorre no final da deformação plástica, e a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus ( $T_\beta$ ) da liga de titânio após a deformação plástica.

[0042] Em uma modalidade não limitativa de um método de acordo com a presente divulgação, e como geralmente representado na FIG. 3, a deformação plástica da liga de titânio compreende deformar plasticamente a liga de titânio de modo que toda a deformação plástica equivalente ocorra no campo de fase alfa-beta. Embora a FIG. 3 represente uma temperatura de deformação plástica constante no campo de fase alfa-beta, também está dentro do escopo das modalidades desta invenção que a deformação plástica equivalente

de pelo menos 25% por cento de redução na área no campo de fase alfa-beta ocorre em temperaturas variáveis. Por exemplo, a liga de titânio pode ser trabalhada no campo de fase alfa-beta, enquanto a temperatura da liga diminui gradualmente. Está também dentro do escopo das modalidades aqui, aquecer a liga de titânio durante a deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% por cento na área no campo de fase alfa-beta de modo a manter uma temperatura constante ou quase constante ou a redução de limite na temperatura da liga de titânio, desde que a liga de titânio não seja aquecida na, ou acima da, temperatura beta transus da liga de titânio. Em uma modalidade não limitativa, deformar plasticamente a liga de titânio na região de fase alfa-beta compreende deformar plasticamente a liga em uma faixa de temperatura de deformação plástica de apenas abaixo da temperatura beta transus, ou cerca de 18°F (10°C) abaixo da temperatura beta transus para 222°C abaixo da temperatura beta transus. Em outra modalidade não limitativa, deformar plasticamente a liga de titânio na região de fase alfa-beta compreende deformar plasticamente a liga em uma faixa de temperatura de deformação plástica de 222°C abaixo da temperatura beta transus para 20°F (11,1°C) abaixo da temperatura beta transus. Em ainda outra modalidade não limitativa, deformar plasticamente a liga de titânio na região da fase alfa-beta compreende deformar plasticamente a liga metálica em uma faixa de temperatura de deformação plástica de 50°F (27,8°C) abaixo da temperatura beta transus a 222°C abaixo da temperatura beta transus.

[0043] Com referência ao gráfico esquemático de temperatura versus tempo da FIG. 4, um outro método não limitativo 30 de acordo com a presente divulgação inclui uma característica referida aqui como processamento “através de transus beta “. Em modalidades não limitativas que incluem processamento através de transus beta, a deformação plástica (também referida aqui como “trabalho”) começa com a temperatura da liga de titânio na, ou acima da, temperatura beta transus ( $T_\beta$ ) da liga de titânio. Além disso, no processamento através de transus beta, a deformação plástica 32 inclui deformar plasticamente a liga de titânio a partir de uma temperatura 34 que está na, ou acima da, temperatura beta transus para uma temperatura de deformação plástica final 24, que está no campo de fase alfa-beta da liga de titânio. Assim, a temperatura da liga de titânio passa “através” da temperatura beta transus durante a deformação plástica 32. Além disso, no processamento através de transus beta, a deformação plástica equivalente a pelo menos uma redução de 25% na área

ocorre no campo de fase alfa-beta, e a liga de titânio não é aquecida a uma temperatura na, ou acima da, temperatura beta transus ( $T_\beta$ ) da liga de titânio após deformar plasticamente a liga de titânio no campo de fase alfa-beta. O gráfico esquemático de temperatura versus tempo da FIG. 4 ilustra que modalidades não limitativas de métodos de tratamento térmico de ligas de titânio para conferir alta resistência e alta tenacidade divulgadas aqui contrastam com as práticas convencionais de tratamento térmico para conferir alta resistência e alta tenacidade para ligas de titânio. Por exemplo, as práticas convencionais de tratamento térmico tipicamente requerem tratamentos térmicos de multietapas e equipamento sofisticado para controlar estreitamente as taxas de resfriamento de liga e são, portanto, caras e não podem ser praticadas em todas as instalações de tratamento térmico. As modalidades do processo ilustrado pela FIG. 4, no entanto, não envolvem tratamento térmico de multietapas e podem ser conduzidas usando equipamento de tratamento térmico convencional.

[0044] Em certas modalidades não limitativas de um método de acordo com a presente divulgação, deformar plasticamente a liga de titânio em um processo através de transus beta compreende deformar plasticamente a liga de titânio em uma faixa de temperatura de 200°F (111 °C) acima da temperatura beta transus da liga de titânio para 222 °C abaixo da temperatura beta transus, passando através da temperatura beta transus durante a deformação plástica. O inventor determinou que esta faixa de temperatura é eficaz desde que (i) uma deformação plástica equivalente a pelo menos uma redução de 25% na área ocorra no campo de fase alfa-beta e (ii) a liga de titânio não seja aquecida a uma temperatura na, ou acima da, temperatura beta transus após a deformação plástica no campo de fase alfa-beta.

[0045] Em modalidades de acordo com a presente divulgação, a liga de titânio pode ser plasticamente deformada por técnicas incluindo, mas não limitadas a, forjamento, forjamento rotativo, forjamento por percussão, forjamento de multieixos, rolamento de barra, rolamento da placa, e extrusão ou por combinações de duas ou mais destas técnicas. A deformação plástica pode ser realizada por qualquer técnica de processamento de moagem adequada conhecida agora ou a seguir por uma pessoa versada na técnica, desde que a técnica de processamento usada seja capaz de deformar plasticamente a peça de trabalho de liga de titânio na região da fase alfa-beta por pelo menos um equivalente de uma redução de 25% na área.

[0046] Como indicado acima, em certas modalidades não limitativas de um método

de acordo com a presente divulgação, a deformação plástica da liga de titânio para pelo menos um equivalente de uma redução de 25% na área que ocorre na região da fase alfa-beta não altera substancialmente as dimensões finais da liga de titânio. Isto pode ser conseguido por uma técnica tal como, por exemplo, forjamento de multieixos. Em outras modalidades, a deformação plástica compreende uma redução real na área de uma seção transversal da liga de titânio mediante a conclusão da deformação plástica. Uma pessoa versada na técnica reconhece que a redução na área de uma liga de titânio resultante da deformação plástica pelo menos equivalente a uma redução na área de 25% poderia resultar, por exemplo, na alteração real da área de seção transversal referida da liga de titânio, isto é, uma redução real na área, em qualquer lugar de tão pouco quanto 0% ou 1%, e até 25%. Além disso, uma vez que a deformação plástica total pode compreender a deformação plástica equivalente a uma redução na área de até 99%, as dimensões reais da peça de trabalho após a deformação plástica equivalente a uma redução na área de até 99% podem produzir uma alteração real na área da seção transversal referida da liga de titânio em qualquer lugar de tão pouco quanto 0% ou 1%, e até 99%.

[0047] Uma modalidade não limitativa de um método de acordo com a presente divulgação compreende resfriamento da liga de titânio à temperatura ambiente após deformar plasticamente a liga de titânio e antes de tratar por calor a liga de titânio. O resfriamento pode ser conseguido por resfriamento do forno, resfriamento do ar, água de resfriamento, ou qualquer outra técnica de resfriamento adequada conhecida agora ou a seguir por uma pessoa versada na técnica.

[0048] Um aspecto da presente divulgação é tal que, após trabalho a quente da liga de titânio de acordo com as modalidades divulgadas aqui, a liga de titânio não é aquecida par, ou acima da, temperatura beta transus. Portanto, a etapa de tratamento térmico não ocorre na, ou acima da, temperatura beta transus da liga. Em certas modalidades não limitativas, o tratamento térmico compreende o aquecimento da liga de titânio a uma temperatura ("temperatura de tratamento térmico") na faixa de 900°F (482°C) a 1500°F (816°C) durante um tempo ("tempo de tratamento térmico") na faixa de 0,5 hora a 24 horas. Em outras modalidades não limitativas, a fim de aumentar a tenacidade à fratura, a temperatura de tratamento térmico pode ser superior à temperatura de deformação plástica final, mas inferior à temperatura beta transus da liga. Em outra modalidade não limitativa, a temperatura de trata-



mento térmico ( $T_h$ ) é menor ou igual à temperatura beta transus menos 20°F (11,1 °C), isto é,  $T_h \leq (T_\beta - 20^\circ \text{F})$ . Em outra modalidade não limitativa, a temperatura de tratamento térmico ( $T_h$ ) é menor ou igual à temperatura beta transus menos 50°F (27,8 °C), isto é,  $T_h \leq (T_\beta - 50^\circ \text{F})$ . Em ainda outras modalidades não limitativas, uma temperatura de tratamento térmico pode estar em uma faixa de pelo menos 900°F (482 °C) à temperatura beta transus menos 20°F (11,1 °C), ou em uma faixa de pelo menos 900°F (482 °C) à temperatura beta transus menos 50°F (27,8 °C). Entende-se que os tempos de tratamento térmico podem ser mais do que 24 horas, por exemplo, quando a espessura da peça requer tempos de aquecimento longos.

[0049] Outra modalidade não limitativa de um método de acordo com a presente divulgação compreende o envelhecimento direto após deformar plasticamente a liga de titânio, em que a liga de titânio é resfriada ou aquecida diretamente para a temperatura de tratamento térmico após deformar plasticamente a liga de titânio no campo de fase alfa-beta. Acredita-se que, em certas modalidades, não limitativas do presente método em que a liga de titânio é resfriada diretamente para a temperatura de tratamento térmico após a deformação plástica, a taxa de resfriamento não irá significativamente negativamente afetar as propriedades de resistência e tenacidade alcançadas pela etapa de tratamento térmico. Em modalidades não limitativas do presente método em que a liga de titânio é tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico acima da temperatura de deformação plástica final, mas abaixo da temperatura beta transus, a liga de titânio pode ser diretamente aquecida à temperatura de tratamento térmico após deformar plasticamente a liga de titânio no campo de fase alfa-beta.

[0050] Certas modalidades não limitativas de um método termomecânico de acordo com a presente divulgação incluem a aplicação do processo para uma liga de titânio que é capaz de reter fase  $\beta$  à temperatura ambiente. Como tal, ligas de titânio que podem ser vantajosamente processadas por várias modalidades dos métodos de acordo com a presente divulgação incluem ligas de titânio beta, ligas de titânio beta metaestáveis, ligas de titânio próximas de beta, ligas de titânio alfa-beta e ligas de de titânio próximas de alfa. É contemplado que os métodos divulgados aqui podem também aumentar a resistência e a tenacidade de ligas de titânio alfa, porque, como discutido acima, até mesmo os graus de titânio CP incluem pequenas concentrações de fase  $\beta$  à temperatura ambiente.

[0051] Em outras modalidades não limitativas de métodos de acordo com a presente divulgação, os métodos podem ser usados para processar as ligas de titânio que são capazes de reter a fase  $\beta$  à temperatura ambiente, e que são capazes de reter ou precipitar a fase  $\alpha$  após o envelhecimento. Estas ligas incluem, mas não estão limitadas a, categorias gerais de ligas de titânio beta, de ligas de titânio alfa-beta e de ligas alfa compreendendo pequenas percentagens de volume de fase  $\beta$ .

[0052] Exemplos não limitativos de ligas de titânio que podem ser processadas usando as modalidades dos métodos de acordo com a presente divulgação incluem: ligas de titânio alfa/beta, tais como, por exemplo, a liga Ti-6Al-4V (Números UNS R56400 e R54601) e liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Números UNS R54620 e R54621); ligas de titânio próximas de beta, tal como, por exemplo, a liga Ti-10V-2Fe-3Al (UNS R54610)); ligas de titânio beta metaestáveis, tais como, por exemplo, liga Ti-15Mo (UNS R58150) e liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (UNS não atribuído).

[0053] Após o tratamento térmico de uma liga de titânio de acordo com certas modalidades não limitativas divulgadas aqui, a liga de titânio pode ter uma resistência à tensão final na faixa de 138 ksi e 179 ksi. As propriedades de resistência à tensão final discutidas neste documento podem ser medidas de acordo com a especificação da norma ASTM E8-04 "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials". Além disso, após o tratamento térmico de uma liga de titânio de acordo com certas modalidades não limitativas de métodos de acordo com a presente divulgação, a liga de titânio pode ter uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  na faixa de  $59 \text{ Ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$  a  $100 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ . Os valores de tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  discutidos aqui podem ser medidos de acordo com a especificação ASTM E399 - 08, "Método de Teste Padrões para Tenacidade à Fratura Linear-Elastica Plana-Esticada  $K_{Ic}$  de Materiais Metálicos". Além disso, após o tratamento térmico de uma liga de titânio de acordo com certas modalidades não limitativas no escopo da presente divulgação, a liga de titânio pode ter uma resistência ao escoamento na faixa de 134 ksi e 170 ksi. Além disso, após o tratamento térmico de uma liga de titânio de acordo com certas modalidades não limitativas no escopo da presente divulgação, a liga de titânio pode ter um alongamento percentual na faixa de 4,4% a 20,5%.

[0054] Em geral, faixas vantajosas de resistência e tenacidade à fratura por ligas de titânio que podem ser alcançadas pela prática das modalidades de métodos de acordo com

a presente divulgação incluem, mas não estão limitadas a, uma resistência à tensão final de 140 ksi a 180 ksi com tenacidade à fratura variando de cerca de  $40 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $100 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ , ou resistência à tensão final de 140 ksi a 160 Ksi com tenacidade à fratura variando de  $60 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $80 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ . Ainda em outras modalidades não limitativas, as faixas vantajosas de força e tenacidade à fratura incluem resistência à tensão final de 160 ksi a 180 ksi com tenacidade à fratura variando de  $40 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $60 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ . Outras faixas de vantajosas de tenacidade à fratura e resistência que podem ser alcançadas através da prática certas modalidades de métodos de acordo com a presente divulgação incluem, mas não estão limitadas a: resistência à tensão final de 135 ksi a 180 ksi com tenacidade à fratura variando de  $55 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $100 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ ; resistências à tensão finais variando de 160 ksi a 180 ksi com tenacidade à fratura variando de  $60 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $90 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ ; e resistências à tensão finais variando de 135 ksi a 160 ksi com valores de tenacidade à fratura que variam de  $85 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$  a  $95 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} K_{Ic}$ .

[0055] Em uma modalidade não limitativa de um método de acordo com a presente divulgação, após tratamento térmico da liga de titânio, a liga tem uma resistência à tensão média final de pelo menos 166 ksi, uma resistência ao escoamento média de pelo menos 148 ksi, um alongamento percentual de pelo menos 6%, e uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos  $65 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ . Outras modalidades não limitativas de métodos de acordo com a presente divulgação fornecem uma liga de titânio tratada termicamente tendo uma resistência à tensão de pelo menos 150 ksi e uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos  $70 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ . Ainda outras modalidades não limitativas de métodos de acordo com a presente divulgação fornecem uma liga de titânio tratada termicamente tendo uma resistência à tensão de pelo menos 135 ksi e uma tenacidade à fratura de pelo menos  $55 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ .

[0056] Um método não limitativo de acordo com a presente divulgação para tratar termomecanicamente uma liga de titânio compreende trabalhar (isto é, deformar plasticamente) uma liga de titânio em uma faixa de temperatura de 200°F (111 °C) acima de uma temperatura beta transus da liga de titânio para 222 °C abaixo da temperatura beta transus. Durante a porção final da etapa de trabalho, uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% na área ocorre em um campo de fase alfa-beta da liga de titânio. Após a etapa de trabalho, a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus. Em modalidades não limitativas, após a etapa de trabalho a liga de titânio pode ser

tratada termicamente a uma temperatura de tratamento térmico que varia entre 900°F (482°C) e 1500°F (816°C) durante um tempo de tratamento térmico que varia entre 0,5 e 24 horas.

[0057] Em certas modalidades não limitativas de acordo com a presente divulgação, o trabalho da liga de titânio fornece uma deformação plástica equivalente maior que uma redução de 25% na área e até uma redução de 99% em área, em que uma deformação plástica equivalente de pelo menos 25% ocorre na região de fase alfa-beta da liga de titânio da etapa de trabalho e a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus após a deformação plástica. Uma modalidade não limitativa compreende trabalhar a liga de titânio no campo de fase alfa-beta. Em outras modalidades não limitativas, o trabalho compreende trabalhar a liga de titânio a uma temperatura igual ou acima da temperatura beta transus até uma temperatura de trabalho final no campo alfa-beta, em que o trabalho compreende uma deformação plástica equivalente de uma redução de 25% na área no campo de fase alfa-beta da liga de titânio e a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus após a deformação plástica.

[0058] A fim de determinar as propriedades termomecânicas de ligas de titânio que são úteis para certas aplicações aeroespaciais e aeronáuticas, dados de ensaios mecânicos de ligas de titânio que foram processados de acordo com as práticas do estado da técnica em ATI Allvac e dados coletados da literatura técnica foram coletados. Como usado aqui, uma liga tem propriedades mecânicas que são “úteis” para uma aplicação particular, se tenacidade e resistência da liga são pelo menos tão altas quanto ou estão dentro de uma faixa que é necessária para a aplicação. As propriedades mecânicas para as seguintes ligas que são úteis para certas aplicações aeroespaciais e aeronáuticas foram coletadas: Ti-10V-2Fe-3-Al (Ti 10-2-3; UNS R54610), Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3; UNS não atribuído), liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2; Números UNS R54620 e R54621), Ti-6Al-4V (Ti 6-4; Números UNS R56400 e R54601), Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti 6-2-4-6; UNS R56260), Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-0,25Si (Ti 6-22-22; AMS 4898), e Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Ti 3-8-6-4-4; AMS 4939, 4957, 4958). A composição de cada uma destas ligas é relatada na literatura e é bem conhecida. Faixas de composição química típicas, em porcentagem em peso, de ligas de titânio exemplares não limitativas que são passíveis dos métodos descritos aqui são apresentadas na Tabela 1. Entende-se que as ligas apresentadas na Tabela 1 são apenas exemplos

não limitativos de ligas que podem apresentar uma resistência e tenacidade aumentadas quando processadas de acordo com modalidades aqui descritos, e que outras ligas de titânio, reconhecidas por um praticante qualificado agora ou daqui por diante, estão também dentro do escopo das modalidades aqui divulgadas.

Tabela 1								
(% em peso)								
	Ti 10-2-3	Ti-5-5-3	Ti 6-2-4-2	Ti 6-4	Ti 6-2-4-6	Ti 6-22-22	Ti 3-8-6-4-4	Ti-15MO
Al	2,6-3,4	4,0-6,3	5,5-6,5	5,5-6,75	5,5-6,5	5,5-6,5	3,0-4,0	
V	9,0-11,0	4,5-5,9		3,5-4,5			7,5-8,5	
Mo		4,5-5,9	1,80-2,20		5,50-6,50	1,5-2,5	3,5-4,5	14,00-16,00
Cr		2,0-3,6				1,5-2,5	5,5-6,5	
Cr + Mo						4,0-5,0		
Zr		0,01-0,08	3,60-4,40		3,50-4,50	1,5-2,5	3,5-4,5	
Sn			1,80-2,20		1,75-2,25	1,5-2,5		
Si						0,2-0,3		
C	0,05 máx	0,01-0,25	0,05 máx	0,1 máx	0,04 máx	0,05 máx	0,05 máx	0,10 máx
N	0,05 máx		0,05 máx	0,05 máx	0,04 máx	0,04 máx		0,05 máx
O	0,13 máx	0,03-0,25	0,15 máx	0,20 máx	0,15 máx	0,14 máx	0,14	
H	0,015 máx		0,0125 máx	0,015 máx	0,0125 máx	0,01 máx	0,020 máx	0,015 máx
Fe	1,6-2,2	0,2-0,8	0,25 máx	0,40 máx	0,15 máx		0,3 máx	0,1 máx
Ti	rem	rem	rem	rem	rem	rem	rem	rem

[0059] As combinações úteis de tenacidade à fratura e resistência ao escoamento exibida pelas ligas acima mencionadas quando processadas usando os processos termomecânicos do estado da técnica processualmente complexos e dispendiosos são apresentados graficamente na FIG. 5. É visto na FIG. 5, que um limite inferior da região do gráfico, incluindo combinações úteis de tenacidade à fratura e resistência ao escoamento, pode ser aproximado pela reta  $y = -0,9x + 173$ , onde “y” é tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  em unidades de ksi

•  $\ln^{1/2}$  e “x” é a resistência ao escoamento (YS) em unidades de ksi. Os dados apresentados nos Exemplos 1 e 3 (ver também FIG. 6) aqui apresentados abaixo demonstram que as modalidades de um método de processamento de ligas de titânio de acordo com a presente divulgação, incluindo deformar plasticamente e tratar termicamente as ligas como aqui descrito, resultam em combinações de tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  e resistência ao escoamento que são comparáveis às obtidas usando técnicas de processamento do estado da técnica processualmente complexas e relativamente dispendiosas. Em outras palavras, com referência à FIG. 5, com base nos resultados obtidos realizando certas modalidades de um método de acordo com a presente divulgação, uma liga de titânio exibindo tenacidade à fratura e resistência ao escoamento de acordo com a Equação (1) pode ser obtida.

$$K_{Ic} \geq -(0,9)YS + 173 \quad (1)$$

[0060] Ainda é visto na FIG. 5, que um limite superior da região do gráfico incluindo combinações úteis de tenacidade à fratura e resistência ao escoamento pode ser aproximado pela reta  $y = -0,9x + 217,6$ , onde “y” é a tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  em unidades de  $\text{ksi} \cdot \ln^{1/2}$  e “x” é a resistência ao escoamento (YS) em unidades de ksi. Por conseguinte, com base nos resultados obtidos realizando modalidades de um método de acordo com a presente divulgação, o presente método pode ser usado para produzir uma liga de titânio exibindo tenacidade à fratura e resistência ao escoamento dentro da região limitada na FIG. 5, que pode ser descrita de acordo com a equação (2).

$$217,6 - (0,9)YS \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9)YS \quad (2)$$

[0061] De acordo com um aspecto não limitativo da presente divulgação, modalidades do método de acordo com a presente divulgação, incluindo etapas de deformação plástica e de tratamento térmico, resultam em ligas de titânio com resistência ao escoamento e tenacidade à fratura que são pelo menos comparáveis às mesmas ligas se transformadas usando técnicas termomecânicas do estado da técnica relativamente caras e processualmente complexas.

[0062] Além disso, como mostrado pelos dados apresentados no Exemplo 1 e Tabelas 1 e 2 aqui a seguir, o processamento da liga de titânio Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr por um método de acordo com a presente divulgação resultou em uma liga de titânio exibindo propriedades mecânicas superiores às obtidas pelo processamento do estado da técnica termomecânico. Ver FIG. 6. Em outras palavras, com referência à região limitada mostrada nas

FIGS. 5 e 6 incluindo as combinações de resistência ao escoamento e tenacidade à fratura conseguidas pelo processamento de termomecânica do estado da técnica, certas modalidades de um método de acordo com a presente divulgação produzem ligas de titânio em que a tenacidade à fratura e a resistência ao escoamento estão relacionadas de acordo com a equação (3).

$$K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9)YS \quad (3)$$

[0063] Os exemplos que seguem destinam-se a descrever modalidades não limitativas adicionais, sem restringir o escopo da presente invenção. As pessoas versadas na técnica apreciarão que as variações dos Exemplos são possíveis dentro do escopo da invenção, que é definido apenas pelas reivindicações.

#### Exemplo 1

[0064] Um lingote de 5 polegadas redondo de liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3), da ATI Allvac, Monroe, Carolina do Norte, foi laminado em uma barra de 2,5 polegadas a uma temperatura inicial de cerca de 1450°F (787,8°C), no campo de fase alfa-beta. A temperatura beta transus da liga Ti 5-5-5-3 foi de cerca de 1530°F (832°C). A liga Ti 5-5-5-3 teve uma química de lingote média de 5,02 por cento em peso de alumínio, 4,87 por cento em peso de vanádio, 0,41 por cento em peso de ferro, 4,90 por cento em peso de molibdênio, 2,85 por cento em peso de cromo, 0,12 por cento em peso de oxigênio, 0,09 por cento em peso de zircônio, 0,03 por cento em peso de silício, titânio restante e impurezas acidentais. A temperatura de trabalho final foi 1480°F (804,4°C), também no campo de fase alfa-beta e não menos do que 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga. A redução do diâmetro da liga correspondeu a uma redução de 75% na área da liga no campo de fase alfa-beta. Após a laminagem, a liga foi resfriada ao ar até à temperatura ambiente. As amostras da liga resfriada foram tratadas termicamente em diversas temperaturas de tratamento térmico para vários tempos de tratamento térmico. As propriedades mecânicas das amostras de liga tratadas com calor foram medidas na direção longitudinal (L) e na direção transversal (T). Os tempos de tratamento térmico e as temperaturas de tratamento térmico usadas para as várias amostras de teste, e os resultados de teste de tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) e tensão para as amostras na direção longitudinal são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Longitudinais e Condições de Tratamento Térmico						
No.	Temperatura de Tratamento térmico (°F/°C)	Tempo de Tratamento Térmico (horas)	Resistência à Tensão final (ksi)	Resistência ao escoamento (ksi)	Percentual de Alongamento	K <sub>IC</sub> (ksi·in <sup>1/2</sup> )
1	1200/649	2	178,7	170,15	11,5	65,55
2	1200/649	4	180,45	170,35	11	59,4
3	1200/649	6	174,45	165,4	12,5	62,1
4	1250/677	4	168,2	157,45	14,5	79,4
5	1300/704	2	155,8	147	16	87,75
6	1300/704	6	153	143,7	17	87,75
7	1350/732	4	145,05	137,95	20	95,55
8	1400/760	2	140,25	134,8	20	99,25
9	1400/760	6	137,95	133,6	20,5	98,2

[0065] Os tempos de tratamento térmico, temperaturas de tratamento térmico, e os resultados de teste de tensão medidos na direção transversal para as amostras são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Transversais e Condições de Tratamento Térmico					
No.	Temperatura de Tratamento Térmico (°F/°C)	Tempo de Tratamento Térmico (horas)	Resistência à Tensão Final (ksi)	Resistência ao escoamento (ksi)	Percentual de alongamento
1	1200/649	2	193,25	182,8	4,4
2	1200/649	4	188,65	179,25	4,5
3	1200/649	6	186,35	174,85	6,5
4	1250/677	4	174,6	163,3	4,5
5	1300/704	2	169,15	157,35	6,5
6	1300/704	6	162,65	151,85	7
7	1350/732	4	147,7	135,25	9
8	1400/760	2	143,65	131,6	12
9	1400/760	6	147	133,7	15

[0066] Alvos típicos para as propriedades de liga Ti 5-5-5-3 usadas em aplicações aeroespaciais incluem uma resistência à tensão final média de pelo menos 150 ksi e um valor K<sub>IC</sub> de tenacidade à fratura mínima de pelo menos 70 ksi · in<sup>1/2</sup>. De acordo com o Exemplo 1, estas propriedades mecânicas alvos foram obtidas pelas combinações de tempo e temperatura de tratamento térmico listadas na Tabela 2 para as amostras de 4-6.

### Exemplo 2

[0067] Espécimes da Amostra n°. 4 do Exemplo 1 foram seccionados aproximadamente no ponto médio de cada espécime e *Krolls* foram gravados para exame da microes-



trutura resultante do laminado e tratamento térmico. A FIG. 7A é uma micrografia óptica (100x) na direção longitudinal e a FIG. 7B é uma micrografia óptica (100x) na direção transversal de um espécime representativo preparado. A microestrutura produzida após a laminação e tratamento térmico a 1250°F (677°C) durante 4 horas é uma fase  $\alpha$  fina dispersa em uma matriz de fase  $\beta$ .

### Exemplo 3

[0068] Uma barra de liga Ti-15Mo obtida a partir de ATI Allvac foi deformada plasticamente para uma redução de 75% a uma temperatura de partida de 1400°F (760,0°C), que está no campo de fase alfa-beta. A temperatura beta transus da liga Ti-15Mo foi de cerca de 1475° (801,7°C). A temperatura de trabalho final da liga foi de cerca de 1200°F (648,9°C), que é não menos do que 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga. Depois do trabalho, a barra de Ti-15Mo foi envelhecida a 900°F (482,2°C) durante 16 horas. Após o envelhecimento, a barra de Ti-15Mo teve finais resistências à tensão finais variando de 178-188 ksi, resistências ao escoamento variando de 170-175 ksi e valores de tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de aproximadamente 30 ksi • in<sup>1/2</sup>.

### Exemplo 4

[0069] Um lingote de 5 polegadas redondo de liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3) é laminado para barras de 2,5 polegadas a uma temperatura inicial de cerca de 1650°F (889°C), no campo de fase beta. A temperatura beta transus da liga Ti 5-5-5-3 é cerca de 1530°F (832°C). A temperatura de trabalho final é 1330°F (721°C), que está no campo de fase alfa-beta e não menos do que 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga. A redução no diâmetro da liga corresponde a uma redução de 75% na área. A temperatura de deformação plástica resfria durante a deformação plástica e passa através da temperatura beta transus. Pelo menos uma redução de 25% da área ocorre no campo de fase alfa-beta na medida em que a liga se resfria durante a deformação plástica. Após a redução de pelo menos 25% no campo de fase alfa-beta a liga não é aquecida acima da temperatura beta transus. Após a laminação, a liga foi ar resfriada até à temperatura ambiente. As ligas são envelhecidas a 1300°F (704°C) durante 2 horas.

[0070] A presente divulgação foi escrita com referência a várias modalidades exemplares, ilustrativas, e não limitativas. No entanto, será reconhecido por pessoas versadas na técnica que várias substituições, modificações ou combinações de qualquer uma das

modalidades divulgadas (ou porções das mesmas) podem ser feitas sem se afastar do escopo da invenção tal como definido apenas pelas reivindicações. Assim, é contemplado e entendido que a presente divulgação engloba modalidades adicionais não expressamente estabelecidas aqui. Tais modalidades podem ser obtidas, por exemplo, pela combinação e/ou modificação de qualquer uma das etapas, ingredientes, constituintes, componentes, elementos, características, aspectos descritos, e semelhantes, das modalidades aqui descritas. Assim, esta divulgação não é limitada pela descrição das várias modalidades exemplares, ilustrativas, e não limitativas, mas sim apenas pelas reivindicações. Desta forma, o requerente se reserva o direito de alterar as reivindicações durante o processamento para adicionar características como diversamente descritas aqui.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para aumentar a resistência e a tenacidade de uma liga de titânio **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

deformar plasticamente uma liga de titânio a uma temperatura em um campo de fase alfa-beta da liga de titânio até uma deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% na área, em que a deformação plástica de pelo menos uma redução de 25% na área ocorre em uma faixa de temperatura de deformação plástica de 10 °C abaixo de uma temperatura beta transus da liga de titânio a 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga de titânio, e em que após deformar plasticamente a liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa-beta a liga de titânio não é aquecida a uma temperatura na ou acima da temperatura beta transus da liga de titânio; e

tratar termicamente a liga de titânio, em que o tratamento térmico da liga de titânio consiste em um tratamento térmico de uma etapa a uma temperatura de tratamento térmico menor ou igual à temperatura beta transus menos 11,1°C por um tempo de tratamento térmico na faixa de 0,5 hora a 24 horas para produzir uma liga tratada termicamente em que uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente está relacionada a uma resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:  $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente está relacionada à resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:

$217,6 - (0,9) YS \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a deformação plástica equivalente de pelo menos uma redução de 25% na área ocorre em uma faixa de temperatura de deformação plástica de 11,1 °C abaixo da temperatura beta transus até 222°C abaixo da temperatura beta transus.

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda deformar plasticamente a liga de titânio a uma temperatura igual ou acima da temperatura beta transus e através da temperatura beta transus antes de deformar plasticamente a liga de titânio a uma temperatura no campo de fase alfa-beta.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o tratamento térmico da liga de titânio compreende aquecer a liga de titânio a uma temperatura de tratamento térmico na faixa de 482°C à temperatura beta transus menos 11,1°C.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que deformar plasticamente a liga de titânio compreende pelo menos um de forjamento, forjamento rotativo, forjamento por percussão, forjamento de multieixos, laminação de barra, laminação de placa e extrusão da liga de titânio.

8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga de titânio é uma liga de titânio que é capaz de reter a fase beta à temperatura ambiente.

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga de titânio é liga Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr.

10. Método, de acordo com a reivindicação 8, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga de titânio é Ti-15Mo.

11. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que após o tratamento térmico da liga de titânio, a liga de titânio apresenta uma resistência à tensão final na faixa de 951 MPa a 1234 MPa.

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que após o tratamento térmico da liga de titânio, a liga de titânio apresenta um percentual de alongamento na faixa de 4,4% a 20,5%.

13. Método, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que após o tratamento térmico da liga de titânio, a liga de titânio apresenta uma resistência à tensão média final de pelo menos 1145 MPa, uma resistência ao escoamento média de pelo menos 1020 MPa, um alongamento percentual de pelo menos 6%, e uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos 71,4 MPa.m<sup>1/2</sup>.

14. Método para tratar termomecanicamente uma liga de titânio **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

trabalhar uma liga de titânio em uma faixa de temperatura de trabalho de 111°C

acima de uma temperatura beta transus da liga de titânio até 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga de titânio, em que pelo menos uma redução de 25% na área da liga de titânio ocorre em um campo de fase alfa-beta da liga de titânio; e em que a liga de titânio não é aquecida acima da temperatura beta transus após os pelo menos 25% de redução na área da liga de titânio no campo de fase alfa-beta da liga de titânio; e

tratar termicamente a liga de titânio, em que o tratamento térmico da liga de titânio consiste em um tratamento térmico de uma etapa em uma temperatura de tratamento térmico em uma faixa de temperatura de tratamento térmico entre 482°C e a temperatura beta transus menos 11,1°C por um tempo de tratamento térmico na faixa de 0,5 hora a 24 horas para produzir uma liga tratada termicamente tendo uma tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) que está relacionada à resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:  $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o trabalho da liga de titânio fornece uma deformação plástica equivalente na faixa de mais que uma redução de 25% na área até uma redução de 99% na área.

16. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o trabalho da liga de titânio compreende trabalhar a liga de titânio de uma temperatura na, ou acima da, temperatura beta transus, no campo alfa-beta e até uma temperatura de trabalho final no campo alfa-beta.

17. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende ainda, depois de trabalhar a liga de titânio, resfriar a liga de titânio até a temperatura de tratamento térmico dentro da faixa de temperatura de tratamento térmico.

18. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga de titânio é uma liga de titânio que é capaz de reter a fase beta à temperatura ambiente.

19. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que após o tratamento térmico da liga de titânio, a liga de titânio tem uma resistência à tensão média final de pelo menos 1145 MPa, uma resistência ao escoamento média de pelo menos 1020 MPa, uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos 71,4  $\text{MPa.m}^{1/2}$ , e um percentual de alongamento de pelo menos 6%.

20. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:  $217,6 - (0,9) YS \geq K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

21. Método, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) da liga tratada termicamente está relacionada com a resistência ao escoamento (YS) da liga tratada termicamente de acordo com a equação:  $K_{Ic} \geq 217,6 - (0,9) YS$ , em que  $K_{Ic}$  está na unidade de  $\text{ksi.in}^{1/2}$  e YS está na unidade de ksi.

22. Método para processar ligas de titânio **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende:

trabalhar uma liga de titânio em um campo de fase alfa-beta da liga de titânio para fornecer pelo menos uma redução equivalente de 25% em área da liga de titânio, em que a liga de titânio é capaz de reter a fase beta à temperatura ambiente; e em que a redução equivalente de 25% em área da liga de titânio ocorre em uma faixa de temperatura de deformação plástica de 10°C abaixo da temperatura beta transus da liga de titânio a 222°C abaixo da temperatura beta transus da liga de titânio, e

tratar termicamente a liga de titânio, em que o tratamento térmico da liga de titânio consiste em um tratamento térmico de uma etapa em uma temperatura de tratamento térmico não maior que a temperatura beta transus menos 11,1°C por um tempo de tratamento térmico na faixa de 0,5 hora a 24 horas para fornecer a liga de titânio com uma resistência à tensão final média de pelo menos 1034 MPa e uma tenacidade à fratura  $K_{Ic}$  de pelo menos 76,9  $\text{MPa.m}^{1/2}$ .

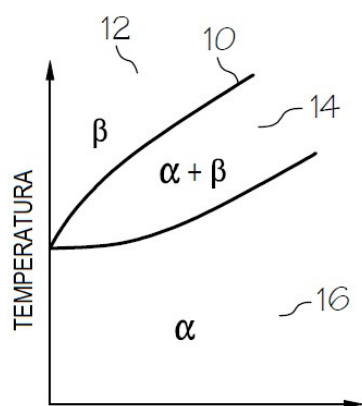


FIG. 1A  
(ESTADO DA TÉCNICA)

PERCENTUAL EM PESO DE ESTABILIZADOR  $\alpha$

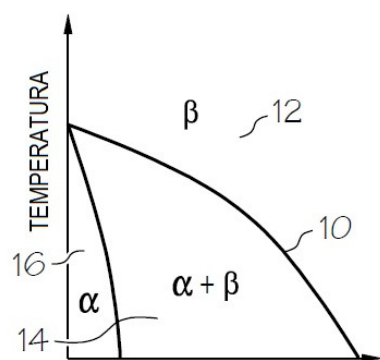


FIG. 1B  
(ESTADO DA TÉCNICA)

PERCENTUAL EM PESO DE ESTABILIZADOR  $\beta$

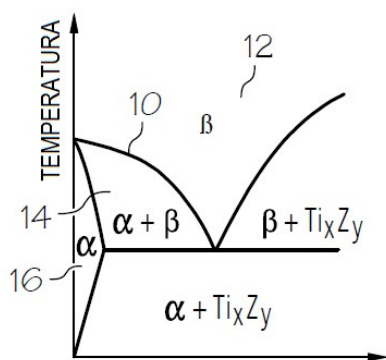


FIG. 1C  
(ESTADO DA TÉCNICA)

PERCENTUAL EM PESO DE ESTABILIZADOR  $\beta$

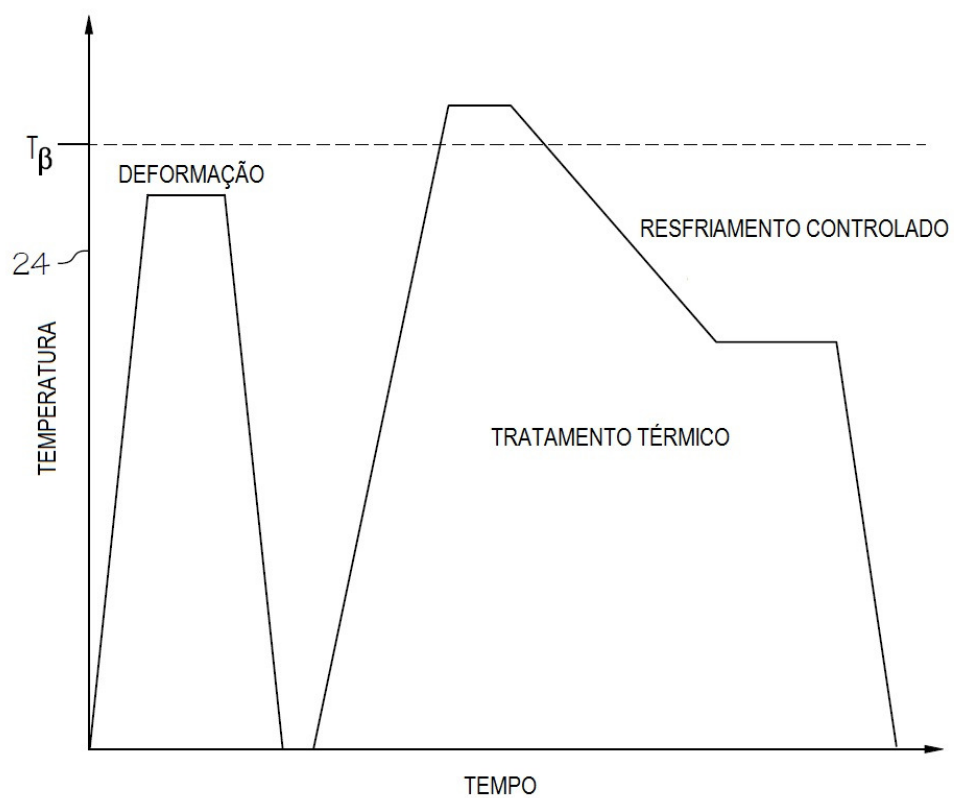


FIG. 2  
(ESTADO DA TÉCNICA)



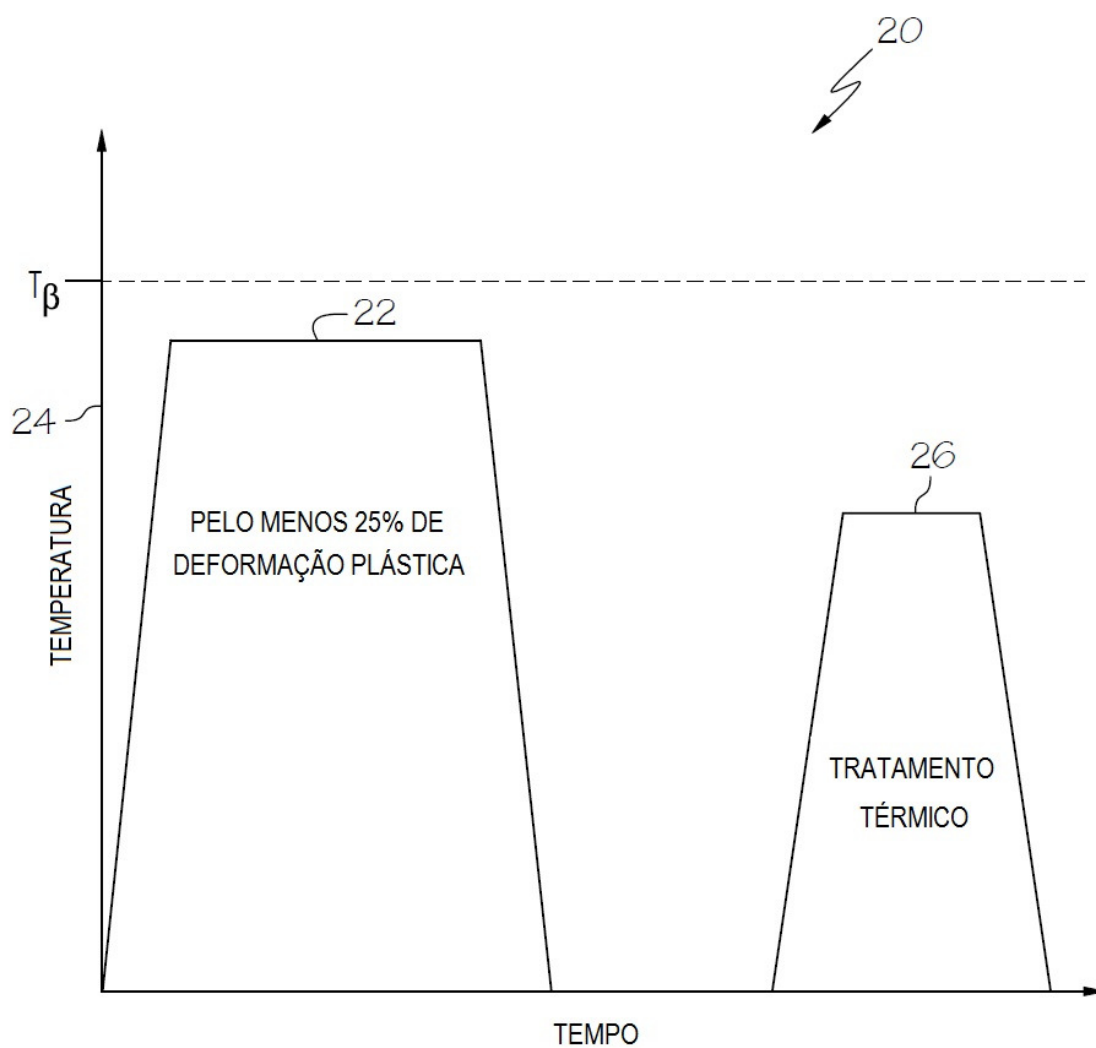


FIG. 3

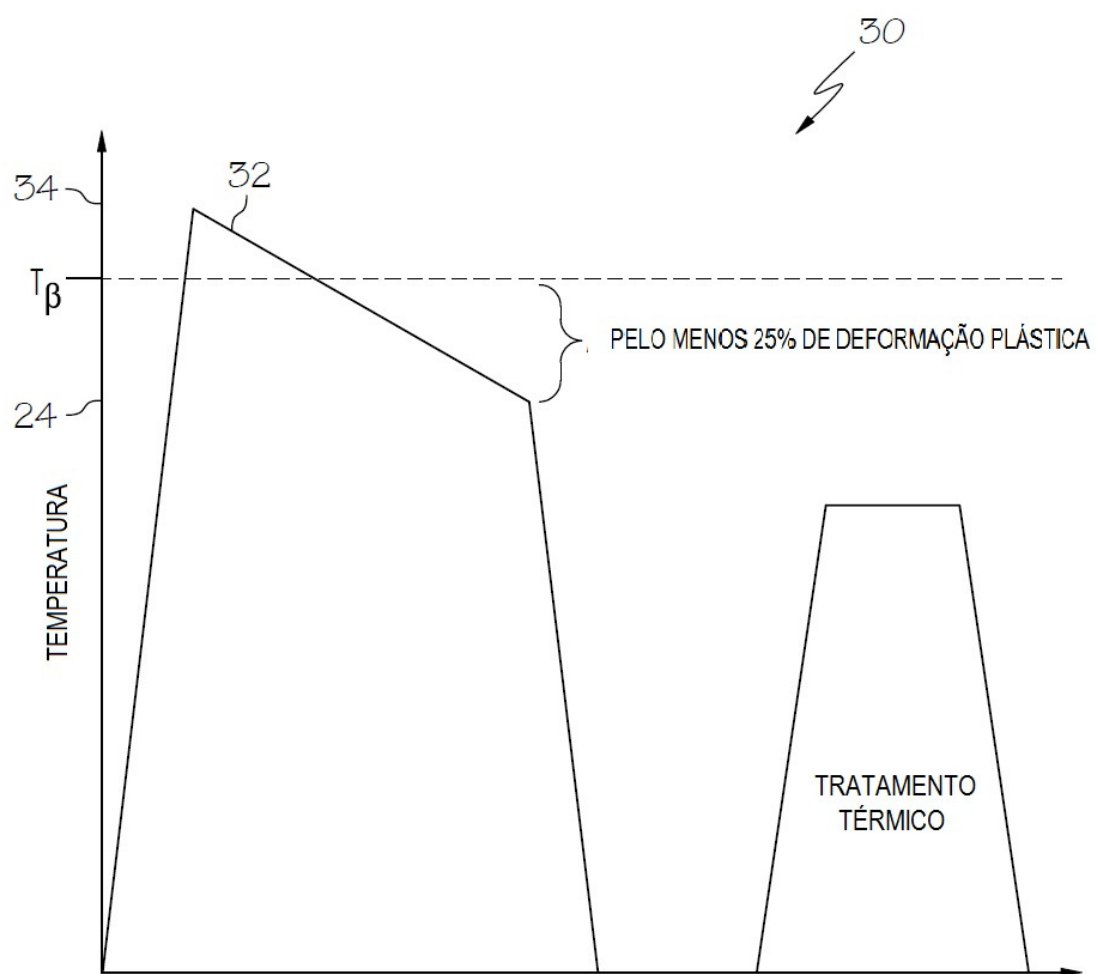


FIG. 4

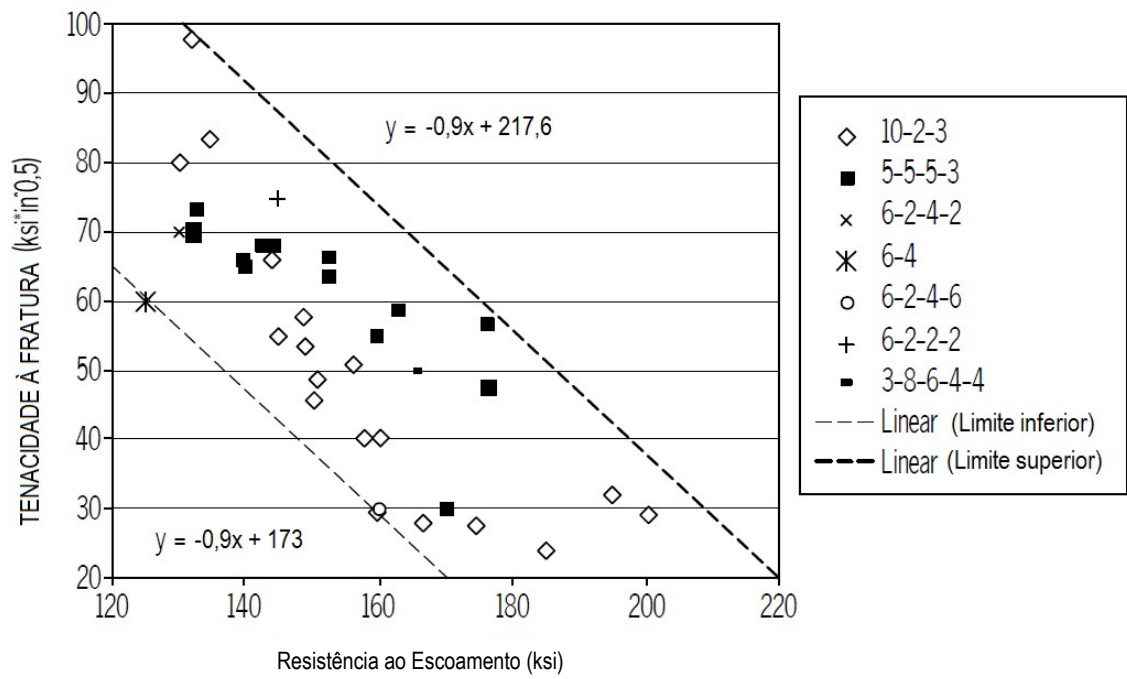


FIG. 5

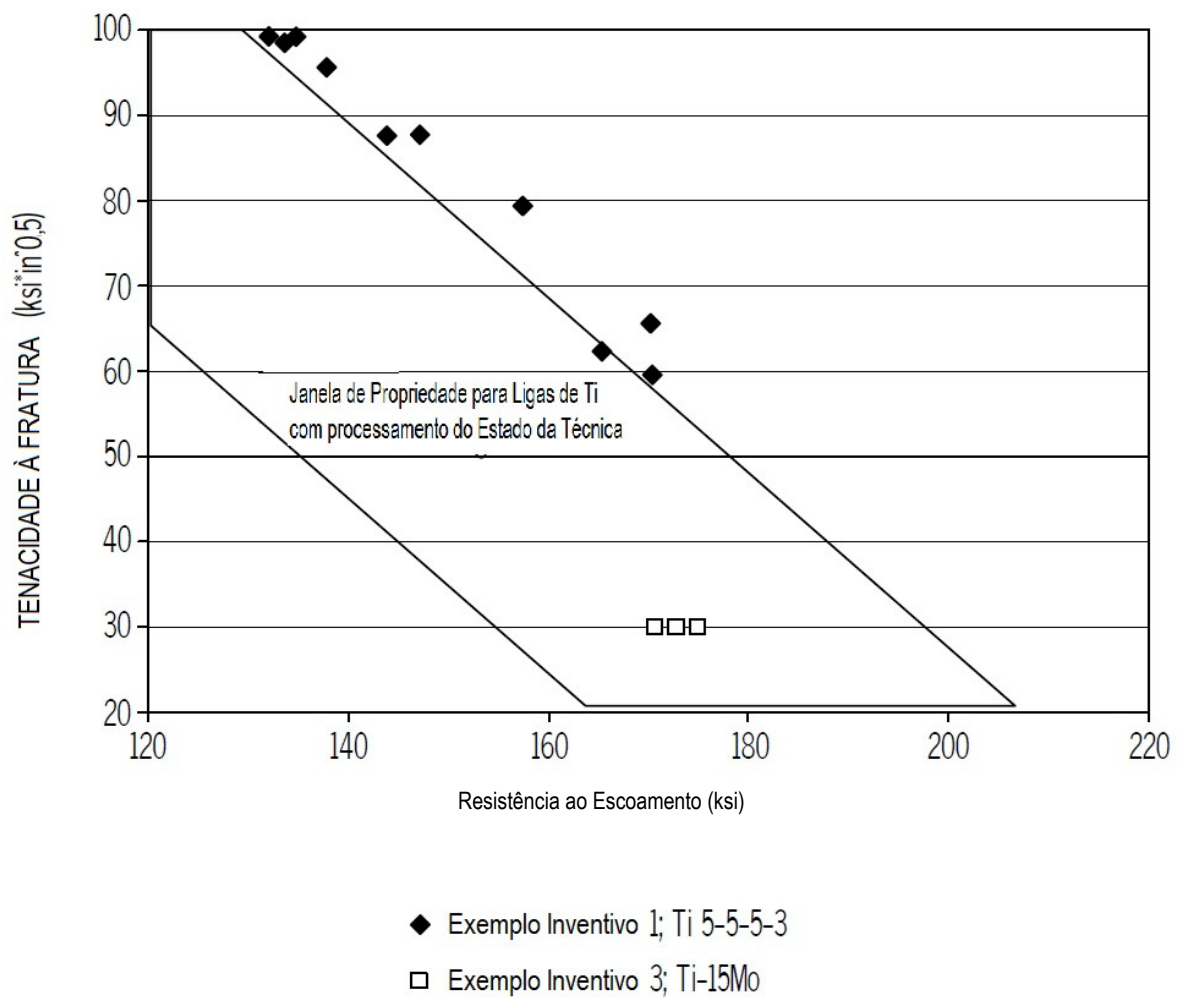


FIG. 6

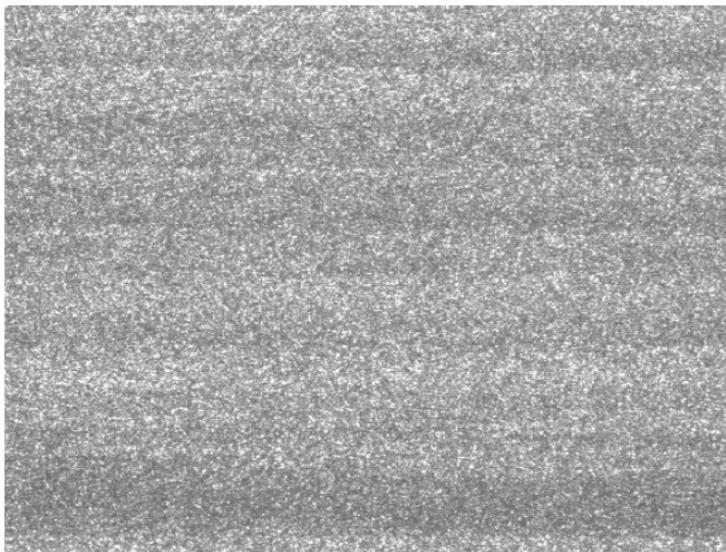


FIG. 7A

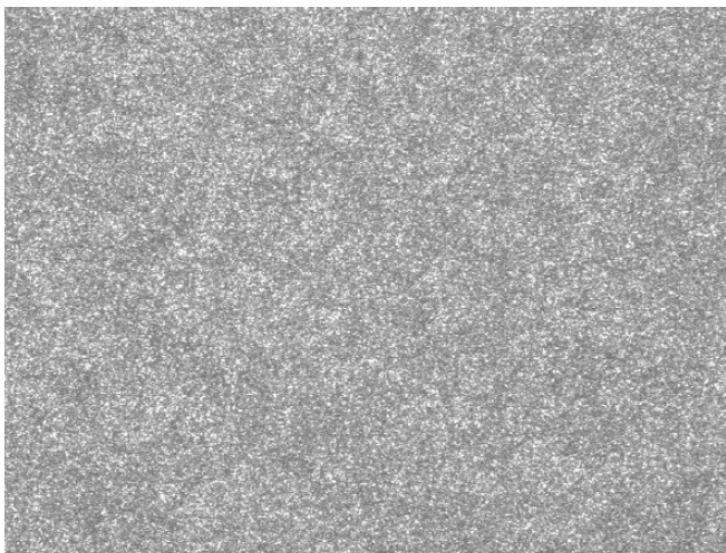


FIG. 7B