



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 718 104**

⑮ Int. Cl.:

C22C 14/00 (2006.01)

C22F 1/18 (2006.01)

⑫

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑧6 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.12.2010 PCT/US2010/062284**

⑧7 Fecha y número de publicación internacional: **28.07.2011 WO11090733**

⑨6 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.12.2010 E 10803547 (8)**

⑨7 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2019 EP 2526215**

⑮ Título: **Fabricación de aleaciones de titanio de alta resistencia**

⑩ Prioridad:

22.01.2010 US 691952

⑮ Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

27.06.2019

⑯ Titular/es:

**ATI PROPERTIES LLC (100.0%)
1600 N.E. Old Salem Road
Albany OR 97321, US**

⑯ Inventor/es:

BRYAN, DAVID J.

⑯ Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 718 104 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Fabricación de aleaciones de titanio de alta resistencia

5 **Antecedentes de la tecnología**

Campo de la tecnología

10 La presente divulgación se refiere a métodos para fabricar aleaciones de titanio que tienen alta resistencia y alta tenacidad. Los métodos de acuerdo con la presente divulgación no requieren los tratamientos de calentamiento de múltiples etapas que se usan en ciertos métodos de fabricación de aleaciones de titanio existentes.

Descripción de los antecedentes de la tecnología

15 Las aleaciones de titanio exhiben por lo general una alta proporción de resistencia con respecto a peso, son resistentes a la corrosión, y son resistentes a la deformación por fluencia lenta a temperaturas moderadamente altas. Por estas razones, se usan aleaciones de titanio en aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas que incluyen, por ejemplo, partes estructurales críticas tales como miembros del tren de aterrizaje y chasis de motores. Las aleaciones de titanio también se usan en los motores de reacción para partes tales como rotores, álabes de compresores, 20 partes del sistema hidráulico, y góndolas.

25 El titanio puro experimenta una transformación de fase allotrópica a aproximadamente 882 °C. Por debajo de esta temperatura, el titanio adopta una estructura cristalina hexagonal compacta, denominada fase α . Por encima de esta temperatura, el titanio tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo, denominada fase β . La temperatura a la que tiene lugar la transformación de la fase α a la fase β se denomina temperatura de transición beta ($T\beta$). La temperatura de transición beta se ve afectada por elementos intersticiales y sustitutivos y, por lo tanto, depende de las impurezas y, de forma más importante, de los elementos de la aleación.

30 En las aleaciones de titanio, los elementos de la aleación se clasifican generalmente como elementos estabilizantes alfa o elementos estabilizantes beta. La adición de elementos estabilizantes alfa ("estabilizadores alfa") al titanio aumenta la temperatura de transición beta. El aluminio, por ejemplo, es un elemento sustitutivo del titanio y es un estabilizador alfa. Los elementos de aleación intersticiales del titanio que son estabilizadores alfa incluyen, por ejemplo, oxígeno, nitrógeno, y carbono.

35 La adición de elementos estabilizantes β al titanio disminuye la temperatura de transición beta, los elementos estabilizantes β pueden ser elementos isomorfos β o elementos eutectoides β , dependiendo de los diagramas de fase resultantes. Algunos ejemplos de elementos de aleación isomorfos β del titanio son vanadio, molibdeno, y niobio. Mediante la aleación con concentraciones suficientes de estos elementos de aleación isomorfos β , es posible disminuir la temperatura de transición β a la temperatura ambiente o menor. Algunos ejemplos de elementos de aleación eutectoides β son cromo y hierro. Además, otros elementos, tales como, por ejemplo, silicio, circonio, y hafnio, son neutros en el sentido de que estos elementos tienen poco efecto en la temperatura de transición β del titanio y las aleaciones de titanio.

45 La Figura 1A representa un diagrama de fase esquemático que muestra el efecto de la adición de un estabilizador alfa al titanio. A medida que aumenta la concentración de estabilizador, también aumenta la temperatura de transición beta, que se observa por la pendiente positiva de la línea 10 de temperatura de transición beta. El campo 12 de fase beta descansa por encima de la línea 10 de temperatura de transición beta y es el área del diagrama de fase donde solo está presente la fase β en la aleación de titanio. En la Figura 1A, un campo 14 de fase alfa-beta descansa por debajo de la línea 10 de temperatura de transición beta y representa el área del diagrama de fase 50 donde están presentes tanto la fase α como la fase β ($\alpha + \beta$) en la aleación de titanio. Por debajo del campo 14 de fase alfa-beta se encuentra el campo 16 de fase alfa, donde solo está presente la fase α en la aleación de titanio.

55 La Figura 1B representa un diagrama de fase esquemático que muestra el efecto de añadir un estabilizador β isomorfo al titanio. Las mayores concentraciones de estabilizadores β reducen la temperatura de transición beta, como indica la pendiente negativa de la línea 10 de temperatura de transición beta. Por encima de la línea 10 de temperatura de transición beta se encuentra el campo 12 de fase beta. También están presentes un campo 14 de fase alfa-beta y un campo 16 de fase alfa en el diagrama de fase esquemático del titanio con estabilizador β isomorfo de la Figura 1B.

60 La Figura 1C representa un diagrama de fase esquemático que muestra el efecto de añadir un estabilizador β eutectoide al titanio. El diagrama de fase exhibe un campo 12 de fase beta, una línea 10 de temperatura de transferencia beta, un campo 14 de fase alfa-beta, y un campo 16 de fase alfa. Además, hay dos campos bifásicos adicionales en el diagrama de fase de la Figura 1C, que contienen fase α o fase β junto con el producto de reacción del titanio y la adición de aleación estabilizante β eutectoide (Z).

65 Las aleaciones de titanio se clasifican en general de acuerdo con su composición química y su microestructura a

temperatura ambiente. El titanio comercialmente puro (CP) y las aleaciones de titanio que contienen solo estabilizadores tales como aluminio se consideran aleaciones alfa. Estas son principalmente aleaciones de fase individual que consisten básicamente en fase α . Sin embargo, el titanio CP y otras aleaciones alfa, después de someterse a recocido por debajo de la temperatura de transición beta, contienen en general aproximadamente un 2-

5 5 por ciento en volumen de fase β , que por lo general se estabiliza con impurezas de hierro en la aleación de titanio alfa. El pequeño volumen de la fase β es útil en la aleación para controlar el tamaño de grano de fase α recristalizada.

10 Las aleaciones de aluminio casi alfa tienen una pequeña cantidad de fase β , habitualmente menos de un 10 por ciento en volumen, lo que da como resultado un aumento de la resistencia a la tracción a temperatura ambiente y un aumento de la resistencia a la deformación por fluencia lenta para temperaturas de uso superiores a 400 °C, en comparación con las aleaciones alfa. Una aleación de titanio casi alfa a modo de ejemplo puede contener aproximadamente un 1 por ciento en peso de molibdeno.

15 Las aleaciones de titanio alfa/beta ($\alpha + \beta$) tales como la aleación Ti-6Al-4V (Ti 6-4) y la aleación Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2), contienen tanto fase alfa como fase beta y se usan ampliamente en las industrias aeroespacial y aeronáutica. La microestructura y las propiedades de las aleaciones alfa/beta se pueden variar a través de tratamientos térmicos y procesamiento termomecánico.

20 Las aleaciones de titanio beta estables, las aleaciones de titanio beta metaestables, y las aleaciones de titanio casi beta, clasificadas colectivamente como "aleaciones beta", contienen básicamente más elementos estabilizantes β que las aleaciones alfa/beta. Las aleaciones de titanio casi beta, tales como, por ejemplo, la aleación Ti-10V-2Fe-3Al, contienen cantidades de elementos estabilizantes β suficientes para mantener una estructura de fase todo β cuando se templan con agua, pero no cuando se templan con aire. Las aleaciones de titanio beta metaestables tales

25 como, por ejemplo, la aleación Ti-15Mo, contienen altos niveles de estabilizadores β y retienen una estructura de fase todo β después de enfriarse con aire, pero se pueden dejar envejecer para precipitar fase α para endurecimiento. Las aleaciones de titanio beta estables tales como, por ejemplo, la aleación Ti-30Mo, retienen una microestructura de fase todo β después de enfriarse, pero no se pueden dejar envejecer para precipitar fase α .

30 Se conoce que las aleaciones alfa/beta son sensibles a las velocidades de enfriamiento cuando se enfrián desde una temperatura superior a la temperatura de transición beta. La precipitación de fase α en los límites de grano durante el enfriamiento reduce la tenacidad de estas aleaciones. En la actualidad, la fabricación de aleaciones de titanio que tienen alta resistencia y alta tenacidad requiere el uso de una combinación de deformaciones a alta temperatura seguidas por un tratamiento térmico complicado de múltiples etapas que incluye controlar

35 cuidadosamente las velocidades de calentamiento y envejecimiento directo. Por ejemplo, el documento de Publicación de Solicitud de Patente de Estados Unidos n.º 2004/0250932 A1 desvela la formación de una aleación de titanio que contiene al menos un 5 % de molibdeno en una forma útil a una primera temperatura por encima de la temperatura de transición beta, o el tratamiento térmico de una aleación de titanio a una primera temperatura por encima de la temperatura de transición beta seguido de enfriamiento controlado a una velocidad de no más de 5 °F

40 (2,8 °C) por minuto hasta una segunda temperatura por debajo de la temperatura de transición beta. La aleación de titanio también se puede tratar térmicamente a una tercera temperatura.

En la Figura 2 se muestra un diagrama esquemático de la temperatura frente al tiempo de un método habitual de la técnica anterior para la fabricación de aleaciones de titanio tenaces de alta resistencia. El método incluye 45 generalmente una etapa de deformación a temperatura elevada llevada a cabo por debajo de la temperatura de transición beta, y una etapa de tratamiento térmico que incluye calentar por encima de la temperatura de transición beta seguido de enfriamiento controlado. Las etapas de procesamiento termomecánicas de la técnica anterior que se usan para fabricar aleaciones de titanio que tienen tanto alta resistencia como alta tenacidad son caras y, en la actualidad, solo un número limitado de fabricantes tienen la capacidad de llevar a cabo estas etapas. Por lo tanto, 50 sería ventajoso proporcionar un proceso mejorado para aumentar la resistencia y/o la tenacidad de las aleaciones de titanio.

El documento de Patente US 2005/257864 desvela aleaciones de titanio beta metaestables y métodos de procesamiento de tales aleaciones. Ciertas realizaciones se refieren a aleaciones de titanio beta metaestables, tales 55 como aleaciones de titanio beta binarias que comprenden más de un 10 por ciento en peso de molibdeno, que tienen resistencias a la tracción de al menos 150 ksi y elongaciones de al menos un 12 por ciento. Otras realizaciones se refieren a métodos de procesamiento de aleaciones de titanio beta metaestables y, más específicamente, métodos de procesamiento de aleaciones de titanio beta binarias que comprenden más de un 10 por ciento en peso de molibdeno, en los que el método comprende trabajo en caliente y envejecimiento directo de la aleación de titanio beta metaestable a una temperatura por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio beta metaestable durante un tiempo suficiente para formar precipitados de fase alfa en la aleación de titanio beta metaestable.

60 El documento de Patente JP 4 074856 tiene como objetivo fabricar material de aleación de titanio beta que tiene una estructura metálica fina y es excelente en resistencia y ductilidad llevando a cabo trabajo en caliente, tratamiento en solución, trabajo en frío, y tratamiento de envejecimiento en regiones específicas de temperatura en el momento de

someter una aleación de titanio beta a estos tratamientos. En el momento de aplicar sucesivamente trabajo en caliente, tratamiento en solución, trabajo en frío, y tratamiento de envejecimiento a una aleación de titanio beta, el tratamiento en solución se ejerce en una región de temperatura bifásica (alfa + beta) menor que la región de temperatura de fase beta, y el trabajo en frío se lleva a cabo en un estado en el que se mezclan pequeñas 5 cantidades de fase alfa.

La invención proporciona un método para el tratamiento de aleaciones de titanio de acuerdo con la reivindicación 1 de las reivindicaciones anexas.

10 De acuerdo con la presente invención, un método para aumentar la resistencia y la tenacidad de una aleación de titanio incluye deformar plásticamente una aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio hasta una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 %. Después de deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta, la aleación de titanio no se calienta hasta una temperatura en o por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio. Además, después de deformar plásticamente la aleación de titanio, la aleación de titanio se trata térmicamente a una temperatura de tratamiento térmico menor o igual que la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para fabricar una aleación tratada térmicamente que tiene una tenacidad de fractura (K_{Ic}) que está relacionada con el límite elástico (YS) de acuerdo con la ecuación $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$. En otra realización, la aleación de titanio se trata térmicamente después de deformación plástica 15 a una temperatura en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio hasta una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % a una temperatura de tratamiento térmico menor o igual que la temperatura de transición beta menos 20 °F durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para fabricar una aleación tratada térmicamente que tiene una tenacidad de fractura (K_{Ic}) que está relacionada con el límite elástico (YS) de acuerdo con la ecuación 20

25
$$K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS.$$

De acuerdo con otro aspecto de la presente divulgación, un método para tratar termomecánicamente una aleación de titanio incluye trabajar una aleación de titanio en un intervalo de temperatura de trabajo de 200 °F (111 °C) por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta antes de deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta. Con la conclusión de la etapa de trabajo se lleva a cabo una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio, y la aleación de titanio no se calienta por encima de la temperatura de transición beta después de la deformación plástica equivalente 30 de una reducción de área de al menos un 25 % en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio. De acuerdo con una realización, después de trabajar la aleación de titanio, la aleación se puede tratar térmicamente en un intervalo de temperatura de tratamiento entre 1500 °F (816 °C) y 900 °F (482 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico entre 0,5 y 24 horas. La aleación de titanio se puede tratar térmicamente en un intervalo de temperatura de tratamiento térmico entre 1500 °F (816 °C) y 900 °F (482 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente 35 para fabricar una aleación tratada térmicamente que tiene una tenacidad de fractura (K_{Ic}) que está relacionada con el límite elástico (YS) de acuerdo con la ecuación $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$ o, en otra realización, de acuerdo con la ecuación $K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS$.

40 De acuerdo con la presente divulgación, el método para procesar aleaciones de titanio comprende trabajar una aleación de titanio en un campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio para proporcionar una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % de la aleación de titanio. En una realización del método, la aleación de titanio es capaz de retener la fase beta a temperatura ambiente. En una realización, después de trabajar la aleación de titanio, la aleación de titanio se puede tratar térmicamente a una temperatura de tratamiento térmico no mayor que la temperatura de transición beta menos 20 °F durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para proporcionar una aleación de titanio con una resistencia media a la rotura por tracción de al 45 menos 1034 MPa (150 ksi) y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos 77 MPa·m^{1/2} (70 ksi·in^{1/2}). En una realización, el tiempo de tratamiento térmico está en el intervalo de 0,5 horas a 24 horas.

Breve descripción de las figuras

55 Las características y las ventajas de los métodos que se describen en el presente documento se pueden comprender mejor por referencia a las figuras acompañantes, en las que:

60 La Figura 1A es un ejemplo de un diagrama de fase para titanio aleado con un elemento estabilizante alfa;

La Figura 1B es un ejemplo de un diagrama de fase para titanio aleado con un elemento estabilizante beta isomorfo;

65 La Figura 1C es un ejemplo de un diagrama de fase para titanio aleado con un elemento estabilizante beta eutectoide;

la Figura 2 es una representación esquemática de un esquema de procesamiento termomecánico de la técnica anterior para la fabricación de aleaciones de titanio tenaces y de alta resistencia;

5 la Figura 3 es un diagrama de tiempo-temperatura de una realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación que comprende básicamente deformación plástica en la fase todo alfa-beta;

la Figura 4 es un diagrama de tiempo-temperatura de otra realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación que comprende deformación plástica "a través de la transición beta";

10 la Figura 5 es un gráfico de la tenacidad de fractura K_{Ic} frente al límite elástico para diversas aleaciones de titanio tratadas térmicamente de acuerdo con procesos de la técnica anterior;

la Figura 6 es un gráfico de la tenacidad de fractura K_{Ic} frente al límite elástico para aleaciones de titanio que se deformaron plásticamente y se trataron térmicamente de acuerdo con realizaciones no limitantes de un método de acuerdo con la presente divulgación y que compara esas realizaciones con aleaciones tratadas térmicamente de acuerdo con procesos de la técnica anterior;

la Figura 7A es una micrografía de una aleación de Ti 5-5-5-3 en la dirección longitudinal después de laminación y tratamiento térmico a 1250 °F (677 °C) durante 4 horas; y

20 la Figura 7B es una micrografía de una aleación de Ti 5-5-3 en la dirección transversal después de laminación
a truenamiento 45% a 1250 °F (677 °C) durante 1 hora.

El lector comprenderá los detalles precedentes, así como otros, tras considerar la siguiente descripción detallada de ciertas realizaciones no limitantes de métodos de acuerdo con la presente divulgación.

Descripción detallada de ciertas realizaciones no limitantes

30 Ciertas realizaciones de acuerdo con la presente divulgación se refieren a métodos termomecánicos para fabricar aleaciones de titanio tenaces y de alta resistencia y que no requieren el uso de tratamientos térmicos complicados de múltiples etapas. Sorprendentemente, y a diferencia de los procesos termomecánicos complejos que se usan en la actualidad y se han usado históricamente con las aleaciones de titanio, ciertas realizaciones de los métodos termomecánicos que se desvelan en el presente documento incluyen solo una etapa de deformación a alta temperatura seguida de un tratamiento térmico en una etapa para impartir a las aleaciones de aluminio las combinaciones de resistencia a la tracción, ductilidad, y tenacidad de fractura requeridas en ciertos materiales aeroespaciales y aeronáuticos. Se espera que las realizaciones de procesamiento termomecánico de la presente divulgación se puedan llevar a cabo en cualquier instalación que esté razonablemente bien equipada para llevar a cabo tratamiento térmico termomecánico de titanio. Las realizaciones contrastan con las prácticas de tratamiento térmico convencionales para impartir alta tenacidad y alta resistencia a las aleaciones de titanio, prácticas que requieren habitualmente equipo sofisticado para controlar estrechamente las velocidades de enfriamiento de la aleación.

Por referencia al gráfico esquemático de la temperatura frente al tiempo de la Figura 3, un método 20 de acuerdo con la presente divulgación para aumentar la resistencia y la tenacidad de una aleación de titanio comprende deformar 22 plásticamente una aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio hasta una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % (véanse las Figuras 1A-1C y la discusión anterior con respecto al campo de fase alfa-beta de una aleación de titanio). La deformación plástica equivalente del 25 % en el campo de fase alfa-beta implica una temperatura 24 de deformación plástica final en el campo de fase alfa-beta. La expresión "temperatura de deformación plástica final" se define en el presente documento como la temperatura de la aleación de titanio a la conclusión de la deformación plástica de la aleación de titanio y antes del envejecimiento de la aleación de titanio. Como se muestra además en la Figura 3, después de la deformación plástica 22, la aleación de aluminio no se calienta por encima de la temperatura de transición beta (T_β) de la aleación de titanio durante el método 20. Como se muestra en la Figura 3, después de la deformación plástica a la temperatura 24 de deformación plástica final, la aleación de titanio se trata térmicamente 26 a una temperatura por debajo de la temperatura de transición beta durante un tiempo suficiente para impartir alta resistencia y alta tenacidad de fractura a la aleación de titanio. El tratamiento térmico 26 se lleva a cabo a una temperatura al menos 20 °F (11 °C) inferior a la temperatura de transición beta. En otra realización, el tratamiento térmico 26 se puede llevar a cabo a una temperatura al menos 50 °F (28 °C) inferior a la temperatura de transición beta. En ciertas realizaciones, la temperatura del tratamiento térmico 26 puede ser inferior a la temperatura 24 de deformación plástica final. En otras realizaciones, no mostradas en la Figura 3, con el fin de aumentar más la tenacidad de fractura de la aleación de aluminio, la temperatura del tratamiento térmico puede ser superior a la temperatura de deformación plástica final, pero menor que la temperatura de transición beta. Se ha de entender que, aunque la Figura 3 muestra una temperatura constante para la deformación plástica 22 y el tratamiento térmico 26, en otras realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación la temperatura de la deformación plástica 22 y/o el tratamiento térmico 26 puede variar. Por ejemplo, una disminución natural en la temperatura de la pieza de trabajo de aleación de titanio que se produzca durante la deformación plástica está dentro del ámbito de las

realizaciones que se desvelan en el presente documento. El gráfico esquemático de temperatura-tiempo de la Figura 3 ilustra que ciertas realizaciones de métodos de tratamiento térmico de aleaciones de titanio para impartir alta resistencia y alta tenacidad que se desvelan en el presente documento difieren de las prácticas de tratamiento térmico convencionales para impartir alta resistencia y alta tenacidad a las aleaciones de titanio. Por ejemplo, las prácticas de tratamiento térmico convencionales requieren por lo general tratamientos térmicos de múltiples etapas y equipo sofisticado para controlar estrechamente las velocidades de enfriamiento de la aleación y, por lo tanto, son caros y no se pueden poner en práctica en todas las instalaciones de tratamiento térmico. Sin embargo, las realizaciones de proceso que se ilustran en la Figura 3 no implican ningún tratamiento térmico de múltiples etapas y se pueden llevar a cabo usando equipo de tratamiento térmico convencional.

Generalmente, la composición específica de la aleación de titanio determina la combinación de tiempo o tiempos de tratamiento térmico y temperatura o temperaturas de tratamiento térmico que impartirán las propiedades mecánicas deseadas usando los métodos de acuerdo con la presente divulgación. Además, los tiempos y las temperaturas de tratamiento térmico se pueden ajustar para obtener un equilibrio específico deseado de resistencia y tenacidad de fractura para una composición de aleación particular. En ciertas realizaciones que se desvelan en el presente documento, por ejemplo, mediante el ajuste de los tiempos y las temperaturas del tratamiento térmico usados para procesar una aleación Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3) mediante un método de acuerdo con la presente divulgación, se consiguieron resistencias a la rotura por tracción de 965 MPa a 1241 MPa (140 ksi a 180 ksi) combinadas con niveles de tenacidad de fractura K_{Ic} de 66 MPa·m^{1/2} a 110 MPa·m^{1/2} (K_{Ic} de 60 ksi·in^{1/2} a 100 ksi·in^{1/2}). Tras considerar la presente divulgación, los expertos habituales en la materia pueden determinar, sin excesivo esfuerzo, la combinación o combinaciones particulares de tiempo y temperatura de tratamiento térmico que impartirá las propiedades óptimas de resistencia y tenacidad a una aleación de titanio particular para su aplicación pretendida.

La expresión "deformación plástica" se usa en el presente documento para indicar la distorsión inelástica de un material bajo una tensión o tensiones aplicadas que fuerzan el material más allá de su límite elástico.

La expresión "reducción de área" se usa en el presente documento para indicar la diferencia entre el área de sección transversal de una forma de aleación de titanio anterior a la deformación plástica y el área de sección transversal de la forma de aleación de titanio después de la deformación plástica, en la que la sección transversal se toma en una ubicación equivalente. La forma de aleación de titanio usada para evaluar la reducción de área puede ser, pero no se limita a, cualquiera de un lingote de sección cuadrada, una barra, una placa, una varilla, una bobina, una lámina, una forma enrollada, y una forma extruida.

Un ejemplo de un cálculo de la reducción de área para la deformación plástica de un lingote de sección redonda de aleación de aluminio de 13 cm (5 pulgadas) de diámetro por laminación del lingote hasta una barra de aleación de titanio redonda de 6,4 cm (2,5 pulgadas), es como sigue a continuación. El área de sección transversal de un lingote de sección redonda de 13 cm (5 pulgadas) de diámetro es π (π) por el cuadrado del radio, o aproximadamente $(3,1415) \times (6,4 \text{ cm (2,5 pulgadas)})^2$, o $128,7 \text{ cm}^2$ ($19,625 \text{ in}^2$). El área de sección transversal de una barra redonda de 6,4 cm (2,5 pulgadas) es aproximadamente $(3,1415) \times (3,18(1,25))^2$, o $32,2 \text{ cm}^2$ ($4,91 \text{ in}^2$). La proporción del área de sección transversal del lingote de partida con respecto a la barra después de la laminación es $4,91/19,625$, o un 25 %. La reducción de área es un 100 % - 25 %, para una reducción de área de un 75 %.

La expresión "deformación plástica equivalente" se usa en el presente documento para indicar la distorsión inelástica de un material bajo tensiones aplicadas que fuerzan el material más allá de su límite elástico. La deformación plástica equivalente puede implicar tensiones que darían como resultado la reducción de área especificada obtenida con una deformación uniaxial, pero se produce de un modo tal que las dimensiones de la forma de la aleación después de la deformación no son básicamente diferentes que las dimensiones de la forma de la aleación antes de la deformación. Por ejemplo, y sin limitación, se suele usar forja en múltiples ejes para someter un lingote de sección cuadrada de aleación de titanio forjado afectado a una deformación plástica considerable, introduciendo dislocaciones en la aleación, pero sin cambiar básicamente las dimensiones finales del lingote. En una realización en la que la deformación plástica equivalente es al menos un 25 %, la reducción de área real puede ser un 5 % o menos. En una realización en la que la deformación plástica equivalente es al menos un 25 %, la reducción de área real puede ser un 1 % o menos. La forja en múltiples ejes es una técnica conocida por el experto habitual en la materia y, por lo tanto, no se describe adicionalmente en el presente documento.

En ciertas realizaciones de acuerdo con la presente divulgación, se puede deformar plásticamente una aleación de titanio a una deformación plástica equivalente de una reducción de área de más de un 25 % y hasta una reducción de área de un 99 %. En ciertas realizaciones en las que la deformación plástica equivalente es mayor de un 25 % de reducción de área, se produce al menos una deformación plástica equivalente de una reducción de área de un 25 % en el campo de fase alfa-beta al final de la deformación plástica, y la aleación de titanio no se calienta por encima de la temperatura de transición beta (T_β) de la aleación de titanio después de la deformación plástica.

En una realización de un método de acuerdo con la presente divulgación, y como se representa generalmente en la Figura 3, deformar plásticamente la aleación de titanio comprende deformar plásticamente la aleación de titanio para que toda la deformación plástica equivalente se produzca en el campo de fase alfa-beta. Aunque la Figura 3 representa una temperatura de deformación plástica constante en el campo de fase alfa-beta, también está dentro

del ámbito de las realizaciones del presente documento que la deformación plástica equivalente de al menos un 25 % de reducción porcentual de área en el campo de fase alfa-beta se produzca a temperaturas variables. Por ejemplo, la aleación de titanio se puede trabajar en el campo de fase alfa-beta mientras que la temperatura de la aleación disminuye gradualmente. También está dentro del ámbito de la realizaciones del presente documento

5 calentar la aleación de titanio durante la deformación plástica equivalente de al menos un 25 % de reducción porcentual de área en el campo de fase alfa-beta de un modo tal que se mantenga una temperatura constante o casi constante o se limite la reducción en la temperatura de la aleación de titanio, siempre que la aleación de titanio no se caliente a o por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio. En una realización, deformar plásticamente la aleación de titanio en la región de fase alfa-beta comprende deformar plásticamente la aleación en

10 un intervalo de temperatura de deformación plástica de justo por debajo de la temperatura de transición beta, o aproximadamente 18 °F (10 °C) por debajo de la temperatura de transición beta a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta. En otra realización, deformar plásticamente la aleación de titanio en la región de fase alfa-beta comprende deformar plásticamente la aleación en un intervalo de temperatura de deformación plástica de 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta a 20 °F (11 °C) por debajo de la temperatura de transición beta. En otra realización más, deformar plásticamente la aleación de titanio en la región de fase alfa-beta comprende deformar plásticamente la aleación en un intervalo de temperatura de deformación plástica de 50 °F (28 °C) por debajo de la temperatura de transición beta a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta.

15 20 Por referencia al gráfico esquemático de la temperatura frente al tiempo de la Figura 4, otro método 30 de acuerdo con la presente divulgación incluye una característica denominada en el presente documento procesamiento "a través de la transición beta". En las realizaciones que incluyen procesamiento a través de la transición beta, la deformación plástica (también denominada en el presente documento "trabajo") comienza con la temperatura de la aleación de titanio en o por encima de la temperatura de transición beta (T_β) de la aleación de titanio. Además, en el procesamiento a través de la transición beta, la deformación plástica 32 incluye deformar plásticamente la aleación de titanio desde una temperatura 34 que está en o por encima de la temperatura de transición beta hasta una temperatura 24 de deformación plástica final que está en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio. De ese modo, la temperatura de la aleación de titanio pasa "a través de" la temperatura de transición beta durante la deformación plástica 32. Además, en el procesamiento a través de la transición beta, la deformación plástica

25 30 equivalente a una reducción de área de al menos un 25 % se produce en el campo de fase alfa-beta, y la aleación de titanio no se calienta a una temperatura a o por encima de la temperatura de transición beta (T_β) de la aleación de titanio después de deformar plásticamente la aleación de titanio en un campo de fase alfa-beta. El gráfico esquemático de temperatura-tiempo de la Figura 4 ilustra que las realizaciones de los métodos de tratamiento térmico de aleaciones de titanio para impartir alta resistencia y alta tenacidad que se desvelan en el presente

35 40 documento difieren de las prácticas de tratamiento térmico convencionales para impartir alta resistencia y alta tenacidad a las aleaciones de titanio. Por ejemplo, las prácticas de tratamiento térmico convencionales requieren por lo general tratamientos térmicos de múltiples etapas y equipo sofisticado para controlar estrechamente las velocidades de enfriamiento de la aleación y, por lo tanto, son caros y no se pueden poner en práctica en todas las instalaciones de tratamiento térmico. Sin embargo, las realizaciones de proceso que se ilustran en la Figura 4 no implican tratamiento térmico en múltiples etapas y se pueden llevar a cabo usando equipo de tratamiento térmico convencional.

45 50 En ciertas realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación, deformar plásticamente la aleación de titanio en un proceso a través de la transición beta comprende deformar plásticamente la aleación de titanio en un intervalo de temperatura de 200 °F (111 °C) por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta, pasando a través de la temperatura de transición beta durante la deformación plástica. El inventor ha determinado que este intervalo de temperatura es eficaz siempre que (i) se produzca una deformación plástica equivalente a una reducción de área de al menos un 25 % en el campo de fase alfa-beta y (ii) la aleación de titanio no se caliente a una temperatura a o por encima de la temperatura de transición beta después de la deformación plástica en el campo de fase alfa-beta.

55 60 En las realizaciones de acuerdo con la presente divulgación, la aleación de titanio se puede deformar plásticamente mediante técnicas que incluyen, pero no se limitan a, forja, forja rotatoria, forja mecánica, forja en múltiples ejes, laminación en barra, laminación en placa, y extrusión, o por combinación de dos o más de estas técnicas. La deformación plástica se puede conseguir mediante cualquier técnica de procesamiento de acería adecuada conocida en la actualidad o en el futuro por el experto habitual en la materia, siempre que la técnica de procesamiento usada sea capaz de deformar plásticamente la pieza de trabajo de aleación de titanio en la región de fase alfa-beta a al menos un equivalente de una reducción de área de un 25 %.

65 66 Como se ha indicado anteriormente, en ciertas realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación, la deformación plástica de la aleación de titanio hasta al menos un equivalente de una reducción de área de un 25 % que se produce en la región de fase alfa-beta no cambia básicamente las dimensiones finales de la aleación de titanio. Esto se puede conseguir mediante una técnica tal como, por ejemplo, forja en múltiples ejes. En otras realizaciones, la deformación plástica comprende una reducción de área real de una sección transversal de la aleación de titanio tras la finalización de la deformación plástica. El experto en la materia entenderá que una reducción de área de una aleación de titanio que resulta de una deformación plástica al menos equivalente a una

reducción de área de un 25 % podría dar como resultado, por ejemplo, el cambio real del área de sección transversal de la aleación de titanio a la que se hace referencia, es decir, una reducción de área real tan pequeña como un 0 % o un 1 %, y hasta un 25 %. Además, dado que la deformación plástica total puede comprender deformación plástica equivalente a una reducción de área de hasta un 99 %, las dimensiones reales de la pieza de trabajo después de la deformación plástica equivalente a una reducción de área de hasta un 99 % puede producir un cambio real en el área de sección transversal de la aleación de titanio a la que se hace referencia tan pequeña como un 0 % o un 1 %, y hasta un 99 %.

Una realización de un método de acuerdo con la presente divulgación comprende enfriar la aleación de titanio a temperatura ambiente después de deformar plásticamente la aleación de titanio y antes de tratar térmicamente la aleación de titanio. El enfriamiento se puede conseguir mediante enfriamiento en horno, enfriamiento con aire, enfriamiento con agua, o cualquier otra técnica de enfriamiento adecuada conocida en la actualidad o que conozca en el futuro el experto habitual en la materia.

Un aspecto de la presente divulgación es tal que después de trabajar en caliente la aleación de titanio de acuerdo con las realizaciones que se desvelan en el presente documento, la aleación de titanio no se calienta a o por encima de la temperatura de transición beta. Por lo tanto, la etapa de tratamiento térmico no se produce a o por encima de la temperatura de transición beta de la aleación. En ciertas realizaciones, tratar térmicamente comprende calentar la aleación de titanio a una temperatura ("temperatura de tratamiento térmico") en el intervalo de 900 °F (482 °C) a 1500 °F (816 °C) durante un tiempo ("tiempo de tratamiento térmico") en el intervalo de 0,5 horas a 24 horas. En otras realizaciones, con el fin de aumentar la tenacidad de fractura, la temperatura de tratamiento térmico puede ser superior a la temperatura de deformación plástica final, pero menor que la temperatura de transición beta de la aleación. En otra realización, la temperatura de tratamiento térmico (T_h) es menor o igual que la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C), es decir, $T_h \leq (T_\beta - 20 °F (11 °C))$. En otra realización, la temperatura de tratamiento térmico (T_h) es menor o igual que la temperatura de transición beta menos 50 °F (28 °C), es decir, $T_h < (T_\beta - 50 °F (28 °C))$. En otras realizaciones más, la temperatura de tratamiento térmico puede estar en un intervalo de al menos 900 °F (482 °C) a la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C), o en un intervalo de al menos 900 °F (482 °C) a la temperatura de transición beta menos 50 °F (28 °C). Se entiende que los tiempos de tratamiento térmico pueden ser mayores que 24 horas, por ejemplo, cuando el espesor de la parte requiere tiempos de tratamiento prolongados.

Otra realización de un método de acuerdo con la presente divulgación comprende envejecimiento directo después de deformar plásticamente la aleación de titanio, en la que la aleación de titanio se enfriá o se calienta directamente a la temperatura de tratamiento térmico después de deformar plásticamente la aleación de titanio en el campo de fase alfa-beta. Se cree que en ciertas realizaciones de la presente invención en las que la aleación de titanio se enfriá directamente a la temperatura de tratamiento térmico después de deformación plástica, la velocidad de enfriamiento afectará considerablemente de forma negativa las propiedades de resistencia y tenacidad conseguidas mediante la etapa de tratamiento térmico. En realizaciones del presente método en las que la aleación de titanio se trata térmicamente a una temperatura de tratamiento térmico superior a la temperatura de deformación plástica final, pero inferior a la temperatura de transición beta, la aleación de titanio se puede calentar directamente a la temperatura de tratamiento térmico después de deformar plásticamente la aleación de titanio en el campo de fase alfa-beta.

Ciertas realizaciones de un método termomecánico de acuerdo con la presente divulgación incluyen aplicar el proceso a una aleación de titanio que es capaz de retener la fase β a temperatura ambiente. Como tales, las aleaciones de titanio que se pueden procesar de forma ventajosa mediante diversas realizaciones de métodos de acuerdo con la presente divulgación incluyen aleaciones de titanio beta, aleaciones de titanio beta metaestables, aleaciones de titanio casi beta, aleaciones de titanio alfa-beta, y aleaciones de titanio casi alfa. Se contempla que los métodos que se desvelan en el presente documento también pueden aumentar la resistencia y la tenacidad de las aleaciones de titanio alfa debido a que, como se ha discutido anteriormente, incluso las calidades de titanio CP incluyen pequeñas concentraciones de fase β a temperatura ambiente.

En otras realizaciones de los métodos de acuerdo con la presente divulgación, los métodos se pueden usar para procesar aleaciones de titanio que son capaces de retener la fase β a temperatura ambiente, y que son capaces de retener o precipitar fase α después de envejecimiento. Estas aleaciones incluyen, pero no se limitan a, las categorías generales de aleaciones de titanio beta, aleaciones de titanio alfa-beta, y aleaciones alfa que comprenden pequeños porcentajes en volumen de fase β .

Algunos ejemplos de aleaciones de titanio que se pueden procesar usando las realizaciones de los métodos de acuerdo con la presente divulgación incluyen: aleaciones de titanio alfa/beta, tales como, por ejemplo, aleación Ti-6Al-4V (números UNS R56400 y R54601) y aleación Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (números UNS R54620 y R54621); aleaciones de titanio casi beta tales como, por ejemplo, aleación Ti-10V-2Fe-3Al (UNS R54610); y aleaciones de titanio beta metaestables tales como, por ejemplo, aleación Ti-15Mo (UNS R58150) y aleación Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (UNS sin asignar).

Después de tratar térmicamente una aleación de titanio de acuerdo con las realizaciones que se desvelan en el

presente documento, la aleación de titanio puede tener una resistencia a la rotura por tracción en el intervalo de 952 MPa a 1234 MPa (138 ksi a 179 ksi). Las propiedades de resistencia a la rotura por tracción que se discuten en el presente documento se pueden medir de acuerdo con la norma ASTM E8 - 04, "Método estándar de ensayo para someter a ensayo la tracción de materiales metálicos". Además, después de tratar térmicamente una aleación de titanio de acuerdo con ciertas realizaciones de los métodos de acuerdo con la presente divulgación, la aleación de titanio puede tener una tenacidad de fractura K_{Ic} en el intervalo de $65 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $110 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (59 ksi·in $^{1/2}$ a 100 ksi·in $^{1/2}$). Los valores de tenacidad de fractura K_{Ic} que se discuten en el presente documento se pueden medir de acuerdo con la norma ASTM E399 - 08, "Método estándar de ensayo para tenacidad de fractura K_{Ic} de tensión de plano elástico lineal de materiales metálicos". Además, después de tratar térmicamente una aleación de titanio de acuerdo con las realizaciones dentro del ámbito de la presente divulgación, la aleación de titanio puede tener un límite elástico en el intervalo de 924 MPa a 1172 MPa (134 ksi a 170 ksi). Además, después de tratar térmicamente una aleación de titanio de acuerdo con las realizaciones dentro del ámbito de la presente divulgación, la aleación de titanio puede tener un porcentaje de elongación en el intervalo de un 4,4 % a un 20,5 %.

En general, los intervalos ventajosos de resistencia y tenacidad de fractura para las aleaciones de titanio que se pueden conseguir poniendo en práctica la realizaciones de los métodos de acuerdo con la presente divulgación incluyen, pero no se limitan a, resistencias a la rotura por tracción de 965 MPa a 1241 MPa (140 ksi a 180 ksi) con una tenacidad de fractura K_{Ic} que varía de aproximadamente $44 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (40 ksi·in $^{1/2}$) a $110 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (100 ksi·in $^{1/2}$) K_{Ic} , o resistencias a la rotura por tracción de 965 MPa a 1103 MPa (140 ksi a 160 ksi) con una tenacidad de fractura K_{Ic} que varía de $66 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $88 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (K_{Ic} de 60 ksi·in $^{1/2}$ a 80 ksi·in $^{1/2}$). En otras realizaciones más, los intervalos ventajosos de resistencia y tenacidad de fractura incluyen resistencias a la rotura por tracción de 1103 MPa a 1241 MPa (160 ksi a 180 ksi) con una tenacidad de fractura K_{Ic} que varía de $44 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $66 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (K_{Ic} de 40 ksi·in $^{1/2}$ a 60 ksi·in $^{1/2}$). Otros intervalos ventajosos de resistencia y tenacidad de fractura que se pueden conseguir poniendo en práctica ciertas realizaciones de los métodos de acuerdo con la presente divulgación incluyen, pero no se limitan a: resistencias a la rotura por tracción de 931 MPa a 1241 MPa (135 ksi a 180 ksi) con una tenacidad de fractura K_{Ic} que varía de $60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $110 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (K_{Ic} de 55 ksi·in $^{1/2}$ a 100 ksi·in $^{1/2}$); resistencias a la rotura por tracción que varían de 1103 MPa a 1241 MPa (160 ksi a 180 ksi) con una tenacidad de fractura que varía de K_{Ic} de $66 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (60 ksi·in $^{1/2}$) a K_{Ic} de $99 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (90 ksi·in $^{1/2}$); y resistencias a la rotura por tracción que varían de 931 MPa a 1103 MPa (135 ksi a 160 ksi) con valores de tenacidad de fractura que varían de K_{Ic} de $93 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (85 ksi·in $^{1/2}$) a K_{Ic} de $104 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (95 ksi·in $^{1/2}$) K_{Ic} .

En una realización de un método de acuerdo con la presente divulgación, después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación tiene una resistencia media a la rotura por tracción de al menos 1145 MPa (166 ksi), un límite elástico medio de al menos 1021 MPa (148 ksi), un porcentaje de elongación de al menos un 6 %, y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $71 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (65 ksi·in $^{1/2}$). Otras realizaciones de métodos de acuerdo con la presente divulgación proporcionan una aleación de titanio tratada térmicamente que tiene una resistencia a la rotura por tracción de al menos 1034 MPa (150 ksi) y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $77 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (70 ksi·in $^{1/2}$). Otras realizaciones más de métodos de acuerdo con la presente divulgación proporcionan una aleación de titanio tratada térmicamente que tiene una resistencia a la rotura por tracción de al menos 931 MPa (135 ksi) y una tenacidad de fractura de al menos $60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (55 ksi·in $^{1/2}$).

Un método de acuerdo con la presente divulgación para tratar termomecánicamente una aleación de titanio comprende trabajar (es decir, deformar plásticamente) una aleación de titanio en un intervalo de temperatura de 200 °F (111 °C) por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta. Durante la parte final de la etapa de trabajo, se produce una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % en un campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio. Después de la etapa de trabajo, la aleación de titanio no se calienta por encima de la temperatura de transición beta. En realizaciones, después de la etapa de trabajo la aleación de titanio se puede tratar térmicamente a una temperatura de tratamiento térmico que varía entre 900 °F (482 °C) y 1500 °F (816 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico que varía entre 0,5 y 24 horas.

En ciertas realizaciones de acuerdo con la presente divulgación, trabajar la aleación de titanio proporciona una deformación plástica equivalente a una reducción de área de de más de un 25 % y hasta una reducción de área de un 99 %, en la que se produce una deformación plástica equivalente de al menos un 25 % en la región de fase alfa-beta de la aleación de titanio de la etapa de trabajo y la aleación de titanio no se trata por encima de la temperatura de transición beta después de la deformación plástica. Una realización comprende trabajar la aleación de titanio en el campo de fase alfa-beta. En otras realizaciones, trabajar comprende trabajar la aleación de titanio a una temperatura a o por encima de la temperatura de transición beta hasta una temperatura de trabajo final en el campo alfa-beta, en el que el trabajo comprende una deformación plástica equivalente de una reducción de área de un 25 % en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio y la aleación de titanio no se calienta por encima de la temperatura de transición beta después de la deformación plástica.

Con el fin de determinar las propiedades termomecánicas de las aleaciones de titanio que son útiles para ciertas aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas, se recogieron datos del ensayo mecánico de aleaciones de titanio que se procesaron de acuerdo con las prácticas de la técnica anterior en ATI Alvac y datos recopilados de la bibliografía técnica. Como se usa en el presente documento, una aleación tiene propiedades mecánicas que son "útiles" para

una aplicación particular si la tenacidad y la resistencia de la aleación son al menos tan altas como o están dentro de un intervalo que se requiere para la aplicación. Se recogieron las propiedades mecánicas para las siguientes aleaciones que se usan para ciertas aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas: Ti-10V-2Fe-3-Al (Ti 10-2-3; UNS R54610), Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3; UNS sin asignar), aleación Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti 6-2-4-2; Números UNS R54620 y R54621), Ti-6Al-4V (Ti 6-4; Números UNS R56400 y 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), y Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Ti 3-8-6-4-4; AMS 4939, 4957, 4958). La composición de cada una de estas aleaciones se informa en la bibliografía y se conoce bien. En la Tabla 1 se presentan los intervalos de composición química habituales, en porcentaje en peso, de aleaciones de titanio a modo de ejemplo no limitantes que son susceptibles a los métodos que se desvelan en el presente documento. Se ha de entender que las aleaciones que se presentan en la Tabla 1 son únicamente ejemplos no limitantes de aleaciones que pueden exhibir un aumento de resistencia y tenacidad cuando se procesan de acuerdo con las realizaciones que se desvelan en el presente documento, y que otras aleaciones de titanio, reconocidas por el experto en la materia en la actualidad o en el futuro, también están dentro del ámbito de las realizaciones que se desvelan en el presente documento.

15

Tabla 1								
(% en 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-15M0
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	resto	resto	resto	resto	resto	resto	resto	resto

Las combinaciones útiles de tenacidad de fractura y límite elástico exhibidas por las aleaciones mencionadas anteriormente cuando se procesan usando los procesos termomecánicos de procedimiento complejo y costosos de la técnica anterior se representan gráficamente en la Figura 5. En la Figura 5 se observa que se puede aproximar un límite inferior de la región de la representación que incluye combinaciones útiles de tenacidad de fractura y límite elástico mediante la línea $y = -0,9x + 173$, donde "y" es la tenacidad de fractura K_{Ic} en unidades de ksi·in^{1/2} y "x" es el límite elástico (YS) en unidades de ksi. Los datos que se presentan en los Ejemplos 1 y 3 (véase también la Figura 6) presentados posteriormente en el presente documento demuestran que las realizaciones de un método de procesamiento de aleaciones de titanio de acuerdo con la presente divulgación, incluyendo deformar plásticamente y tratar térmicamente las aleaciones como se describe en el presente documento, da como resultado combinaciones de tenacidad de fractura K_{Ic} y límite elástico que son comparables a las que se consiguen usando técnicas de procesamiento costosas y con procedimientos relativamente complejos de la técnica anterior. En otras palabras, por referencia a la Figura 5, basándose en los resultados conseguidos llevando a cabo ciertas realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación, se puede conseguir una aleación de titanio que exhibe una tenacidad de fractura y un límite elástico de acuerdo con la Ecuación (1).

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

En la Figura 5 se observa además que se puede aproximar un límite superior de la región de la representación que incluye combinaciones útiles de tenacidad de fractura y límite elástico mediante la línea $y = -0,9x + 217,6$, donde "y"

es la tenacidad de fractura K_{Ic} en unidades de $\text{ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$ y "x" es el límite elástico (YS) en unidades de ksi. Por lo tanto, basándose en los resultados conseguidos llevando a cabo ciertas realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación, el presente método se puede usar para fabricar una aleación de titanio que exhibe una tenacidad de fractura y un límite elástico dentro de la región limitada en la Figura 5, que se puede describir de acuerdo con la Ecuación (2).

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

De acuerdo con un aspecto de la presente divulgación, las realizaciones del método de acuerdo con la presente divulgación, incluyendo las etapas de deformación plástica y tratamiento térmico, dan como resultado aleaciones de titanio que tienen un límite elástico y una tenacidad de fractura que son al menos comparables con las mismas aleaciones si se procesan usando técnicas termomecánicas relativamente costosas y con procedimientos complejos de la técnica anterior.

Además, como se muestra mediante los datos que se presentan posteriormente en el presente documento en el Ejemplo 1 y las Tablas 1 y 2, el procesamiento de la aleación de titanio Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr mediante un método de acuerdo con la presente divulgación dio como resultado una aleación de titanio que exhibió propiedades mecánicas que excedieron de las obtenidas mediante el procesamiento termomecánico de la técnica anterior. Véase la Figura 6. En otras palabras, por referencia a la región limitada que se muestra en las Figuras 5 y 6 que incluyen combinaciones del límite elástico y la tenacidad de fractura que se consiguen mediante procesamiento termomecánico de la técnica anterior, ciertas realizaciones de un método de acuerdo con la presente divulgación producen aleaciones de titanio en las que la tenacidad de fractura y el límite elástico están relacionados de acuerdo con la Ecuación (3).

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

Los ejemplos que siguen a continuación se pretende que describan adicionalmente realizaciones, sin restringir el ámbito de la presente invención. Los expertos habituales en la materia entenderán que son posibles variaciones de los Ejemplos dentro del ámbito de la invención, que se define únicamente mediante las reivindicaciones.

EJEMPLO 1

Un lingote de sección redonda de 13 cm (5 pulgadas) de aleación Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3), de ATI Allvac, Monroe, North Carolina, se laminó en una barra de 6,4 cm (2,5 pulgadas) a una temperatura inicial de aproximadamente 1450 °F (788 °C), en el campo de fase alfa-beta. La temperatura de transición beta de la aleación Ti 5-5-5-3 fue aproximadamente 1530 °F (832 °C). La aleación Ti 5-5-5-3 tenía una química media de lingote de un 5,02 por ciento en peso de aluminio, un 4,87 por ciento en peso de vanadio, un 0,41 por ciento en peso de hierro, un 4,90 por ciento en peso de molibdeno, un 2,85 por ciento en peso de cromo, un 0,12 por ciento en peso de oxígeno, un 0,09 por ciento en peso de circonio, y un 0,03 por ciento en peso de cilicio, siendo el resto titanio e impurezas accidentales. La temperatura de trabajo final fue de 1480 °F (804 °C), también en el campo de fase alfa-beta y no menos de 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación. La reducción de diámetro de la aleación correspondió a una reducción de área de un 75 % de la aleación en el campo de fase alfa-beta. Despues de laminación, la aleación se enfrió con aire a temperatura ambiente. Las muestras de la aleación enfriada se trataron térmicamente a varias temperaturas de tratamiento térmico durante diversos tiempos de tratamiento térmico. Se midieron las propiedades mecánicas de las muestras de aleación tratada térmicamente en la dirección longitudinal (L) y la dirección transversal (T). Los tiempos de tratamiento térmico y las temperaturas de tratamiento térmico que se usaron para las diversas muestras de ensayo, y los resultados de los ensayos de tracción y tenacidad de fractura (K_{Ic}) para las muestras en la dirección longitudinal se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Condiciones de tratamiento térmico y propiedades longitudinales

N.º	Temperatura de tratamiento térmico (°F/°C)	Tiempo de tratamiento térmico (horas)	Resistencia a la rotura por tracción (ksi)	Límite elástico (ksi)	Elongación porcentual	K_{Ic} ($\text{ksi} \cdot \text{in}^{1/2}$)
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

Tabla 2 - Condiciones de tratamiento térmico y propiedades longitudinales						
N.º	Temperatura de tratamiento térmico (°F/°C)	Tiempo de tratamiento térmico (horas)	Resistencia a la rotura por tracción (ksi)	Límite elástico (ksi)	Elongación porcentual	K_{Ic} (ksi·in ^{1/2})
8	1400/760	2	140,25	134,8	20	99,25
9	1400/760	6	137,95	133,6	20,5	98,2

Los tiempos de tratamiento térmico, las temperaturas de tratamiento térmico, y los resultados del ensayo de tracción medidos en la dirección transversal para las muestras se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 - Condiciones de tratamiento térmico y propiedades transversales					
N.º	Temperatura de tratamiento térmico (°F/°C)	Tiempo de tratamiento térmico (horas)	Resistencia a la rotura por tracción (ksi)	Límite elástico (ksi)	Elongación porcentual
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

5 Los objetivos habituales para las propiedades de la aleación Ti 5-5-5-3 usada en aplicaciones aeroespaciales incluyen una resistencia media a la rotura por tracción de al menos 150 ksi y un valor mínimo de tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos 70 ksi·in^{1/2}. De acuerdo con el Ejemplo 1, estos objetivos de las propiedades mecánicas se consiguieron mediante las combinaciones de tiempo y temperatura de tratamiento térmico que se enumeran en la Tabla 2 para las Muestras 4-6.

EJEMPLO 2

15 Se tomó la sección transversal de ejemplares de la Muestra n.º 4 del Ejemplo 1 aproximadamente en el punto medio de cada ejemplar y se realizó un grabado Krolls para el examen de la microestructura resultante del laminado y el tratamiento térmico. La Figura 7A es una microfotografía óptica (100x) en la dirección longitudinal y la Figura 7B es una microfotografía óptica (100x) en la dirección transversal de un ejemplar preparado representativo. La microestructura producida después de laminado y tratamiento térmico a 1250 °F (677 °C) durante 4 horas es una fase α fina dispersa en una matriz de fase β .

20 EJEMPLO 3
25 Se deformó plásticamente una barra de aleación Ti-15Mo obtenida en ATI Alvac hasta un 75 % de reducción a una temperatura inicial de 1400 °F (760,0 °C), que está en el campo de fase alfa-beta. La temperatura de transición beta de la aleación Ti-15Mo fue aproximadamente 1475 °F (801,7 °C). La temperatura de trabajo final de la aleación fue aproximadamente 1200 °F (648,9 °C), que es no menos de 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación. Después del trabajo, la barra de Ti-15Mo se sometió a envejecimiento a 900 °F (482,2 °C) durante 16 horas. Después del envejecimiento, la barra de Ti-15Mo tenía resistencias a la rotura por tracción que variaron de 178-188 ksi, límites elásticos que variaron de 170-175 ksi, y valores de tenacidad de fractura K_{Ic} de aproximadamente 30 ksi·in^{1/2}.

EJEMPLO 4

30 35 Un lingote de sección redonda de 5 pulgadas (13 cm) de aleación Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti 5-5-5-3) se laminó a una barra de 2,5 pulgadas (6,4 cm) a una temperatura inicial de aproximadamente 1650 °F (889 °C), en el campo de fase beta. La temperatura de transición beta de la aleación Ti 5-5-5-3 es aproximadamente 1530 °F (832 °C). La temperatura de trabajo final es 1330 °F (721 °C), que está en el campo de fase alfa-beta y no menos de 400 °F

(222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación. La reducción de diámetro de la aleación corresponde a una reducción de área de un 75 %. La temperatura de deformación plástica disminuye durante la deformación plástica y pasa a través de la temperatura de transición beta. Se produce al menos una reducción de área de un 25 % en el campo de fase alfa-beta a medida que la aleación se enfria durante la deformación plástica.

5 Despues de la reducción de al menos un 25 % en el campo de fase alfa-beta la aleación no se calienta por encima de la temperatura de transición beta. Despues de laminación, la aleación se enfrió con aire a temperatura ambiente. Las aleaciones se sometieron a envejecimiento a 1300 °F (704 °C) durante 2 horas.

10 La presente divulgación se ha descrito por referencia a diversas realizaciones limitantes a modo de ejemplo e ilustrativas. Sin embargo, los expertos en la materia reconocerán que se pueden realizar diversas sustituciones, modificaciones, o combinaciones de cualquiera de las realizaciones desveladas (o partes de las mismas) sin apartarse del ámbito de la invención que se define únicamente mediante las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

5 1. Un método para aumentar la resistencia y la tenacidad de una aleación de titanio Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-0,25Si, Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo o Ti-15Mo, comprendiendo el método:

10 deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura en un campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio hasta una deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 %, en donde la deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % se produce por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio en un intervalo de temperatura de deformación plástica exactamente por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio a 222 °C (400 °F), y en el que después de deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta la aleación de titanio no se calienta a una temperatura a o por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio; y

15 15. tratar térmicamente la aleación de titanio, en donde tratar térmicamente la aleación de titanio consiste en un tratamiento térmico en una etapa a una temperatura de tratamiento térmico menor o igual a la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para fabricar una aleación tratada térmicamente en la que la tenacidad de fractura (K_{Ic} en ksi·in^{1/2}) de la aleación tratada térmicamente está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

20

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

25 y en donde después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio exhibe una resistencia a la rotura por tracción en el intervalo de 952 MPa (138 ksi) a 1234 MPa (179 ksi).

30 2. El método de la reivindicación 1, en el que la tenacidad de fractura (K_{Ic} en ksi·in^{1/2}) de la aleación tratada térmicamente está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

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

35 3. El método de la reivindicación 1 en el que la tenacidad de fractura (K_{Ic} en ksi·in^{1/2}) de la aleación tratada térmicamente está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

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

40 4. El método de la reivindicación 1, en el que deformar plásticamente la aleación de titanio en el campo de fase alfa-beta comprende deformar plásticamente la aleación de titanio hasta una deformación plástica equivalente en el intervalo de una reducción de área de más de un 25 % a una reducción de área de un 99 %.

45 5. El método de la reivindicación 1, en el que la deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % se produce en un intervalo de temperatura de deformación plástica de 20 °F (11 °C) por debajo de la temperatura de transición beta a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta.

50 6. El método de la reivindicación 1, que comprende además deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura a la temperatura de transición beta, o por encima de ella, y a través de la temperatura de transición beta antes de deformar plásticamente la aleación de titanio a una temperatura en el campo de fase alfa-beta.

7. El método de la reivindicación 6, en el que deformar plásticamente la aleación de titanio a la temperatura de transición beta, o por encima de ella, comprende deformar plásticamente la aleación de titanio en un intervalo de temperatura de 200 °F (111 °C) por encima de la temperatura de transición beta a la temperatura de transición beta.

55 8. El método de la reivindicación 1, que comprende además enfriar la aleación de titanio a temperatura ambiente después de deformar plásticamente la aleación de titanio y antes de tratar térmicamente la aleación de titanio.

9. El método de la reivindicación 1, que comprende además enfriar la aleación de titanio a la temperatura de tratamiento térmico después de deformar plásticamente la aleación de titanio y antes de tratar térmicamente la aleación de titanio.

60 10. El método de la reivindicación 1, en el que tratar térmicamente la aleación de titanio comprende calentar la aleación de titanio a una temperatura de tratamiento térmico en el intervalo de 900 °F (482 °C) a la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico en el intervalo de 0,5 horas a 24 horas.

11. El método de la reivindicación 1, en el que deformar plásticamente la aleación de titanio comprende al menos uno de forja, forja rotatoria, forja mecánica, forja en múltiples ejes, laminación en barra, laminación en placa y extrusión de la aleación de titanio.

5 12. El método de la reivindicación 1, en el que la deformación plástica equivalente comprende una reducción de área real de una sección transversal de la aleación de titanio.

10 13. El método de la reivindicación 1, en el que deformar plásticamente la aleación de titanio da como resultado una reducción de área real de una sección transversal de la aleación titanio de un 5 % o menos.

10 14. El método de la reivindicación 4, en el que la deformación plástica equivalente comprende una reducción de área real de una sección transversal de la aleación de titanio.

15 15. El método de la reivindicación 1, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio exhibe una tenacidad de fractura K_{Ic} en el intervalo de $65 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($59 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$) a $111 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($100 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$).

15 16. El método de la reivindicación 1, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio exhibe un límite elástico en el intervalo de 924 MPa (134 ksi) a 1172 MPa (170 ksi).

20 17. El método de la reivindicación 1, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio exhibe un porcentaje de elongación en el intervalo de un 4,4 % a un 20,5 %.

25 18. El método de la reivindicación 1, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio exhibe una resistencia media a la rotura por tracción de al menos 1145 MPa (166 ksi), un límite elástico medio de al menos 1021 MPa (148 ksi), un porcentaje de elongación de al menos un 6 %, y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $71 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($65 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$).

30 19. El método de la reivindicación 1, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio tiene una resistencia a la rotura por tracción de al menos 1034 MPa (150 ksi) y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $77 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($70 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$).

20. El método de la reivindicación 1, en donde el método comprende:

35 deformar plásticamente la aleación de titanio en un intervalo de temperatura de trabajo de 200°F (111°C) por encima de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio a 400°F (222°C) por debajo de la temperatura de transición beta de la aleación de titanio, en donde la deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % de la aleación de titanio se produce en el campo de fase alfa-beta de la aleación de titanio; y

40 en donde el tratamiento térmico en una etapa consiste en calentar a una temperatura de tratamiento térmico en un intervalo de temperatura de tratamiento térmico entre 900°F (482°C) y la temperatura de transición beta menos 20°F (11°C) durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para producir una aleación tratada térmicamente que tiene una tenacidad de fractura (K_{Ic} en $\text{ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$) que está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

45
$$K_{Ic} \geq 173 - (0,9) YS.$$

21. El método de la reivindicación 20, en el que el tiempo de tratamiento térmico está en el intervalo de 0,5 a 24 horas.

50 22. El método de la reivindicación 20, en el que trabajar la aleación de titanio proporciona una deformación plástica equivalente en el intervalo de una reducción de área de más de un 25 % a una reducción de área de un 99 %.

55 23. El método de la reivindicación 20, en el que trabajar la aleación de titanio comprende trabajar la aleación de titanio sustancialmente por completo en el campo de fase alfa-beta.

24. El método de la reivindicación 20, en el que trabajar la aleación de titanio comprende trabajar la aleación de titanio desde una temperatura a la temperatura de transición beta, o por encima de ella, en el campo alfa-beta, y hasta una temperatura de trabajo final en el campo alfa-beta.

60 25. El método de la reivindicación 20, que comprende además, después de trabajar la aleación de titanio y antes de tratar térmicamente la aleación de titanio, enfriar la aleación de titanio a temperatura ambiente.

65 26. El método de la reivindicación 20, que comprende además, después de trabajar la aleación de titanio, enfriar la aleación de titanio a la temperatura de tratamiento térmico dentro del intervalo de temperatura de tratamiento térmico.

27. El método de la reivindicación 20, en el que la aleación de titanio es una aleación de titanio que es capaz de retener la fase beta a temperatura ambiente.

5 28. El método de la reivindicación 20, en el que después de tratar térmicamente la aleación de titanio, la aleación de titanio tiene una resistencia media a la rotura por tracción de al menos 1145 MPa (166 ksi), un límite elástico medio de al menos 1021 MPa (148 ksi), una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $71 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (65 ksi \cdot in $^{1/2}$), y un porcentaje de elongación de al menos un 6 %.

10 29. El método de la reivindicación 20, en el que la tenacidad de fractura (K_{Ic} en ksi \cdot in $^{1/2}$) de la aleación tratada térmicamente está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

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

15 30. El método de la reivindicación 20, en el que la tenacidad de fractura (K_{Ic} en ksi \cdot in $^{1/2}$) de la aleación tratada térmicamente está relacionada con el límite elástico (YS en ksi) de la aleación tratada térmicamente de acuerdo con la ecuación:

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

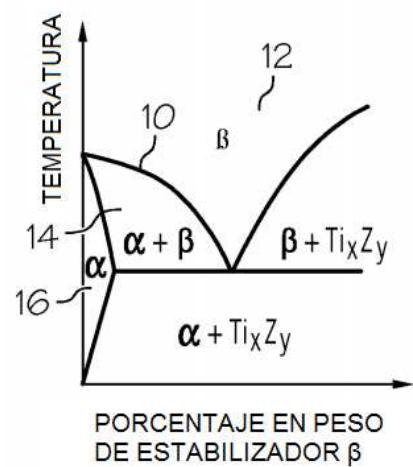
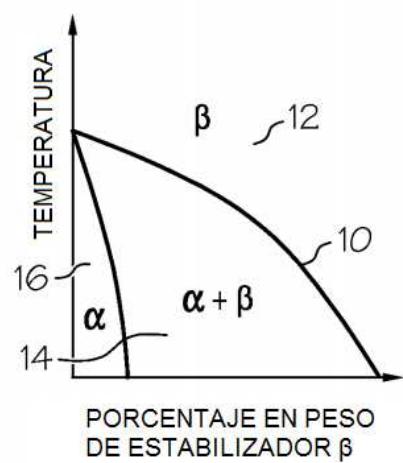
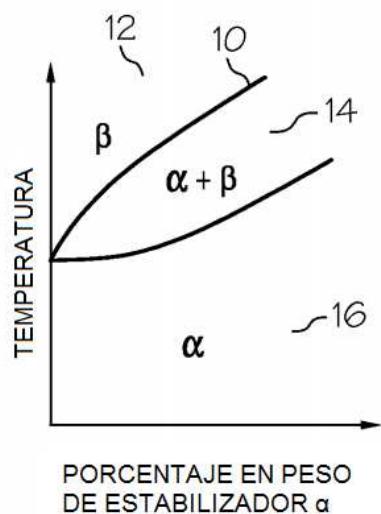
20 31. El método de la reivindicación 1, en el que la aleación de titanio es capaz de retener la fase beta a temperatura ambiente; y en donde el tratamiento térmico en una etapa consiste en calentar a una temperatura de tratamiento térmico no mayor que la temperatura de transición beta menos 20 °F (11 °C) durante un tiempo de tratamiento térmico suficiente para proporcionar la aleación de titanio con una resistencia media a la rotura por tracción de al menos 1034 MPa (150 ksi) y una tenacidad de fractura K_{Ic} de al menos $77 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (70 ksi \cdot in $^{1/2}$).

25 32. El método de la reivindicación 31, en el que el tiempo de tratamiento térmico está en el intervalo de 0,5 horas a 24 horas.

30 33. El método de la reivindicación 1 en el que la deformación plástica se concluye a una temperatura de deformación plástica final; y en donde la temperatura de tratamiento térmico es menor que la temperatura de deformación plástica final.

35 34. El método de la reivindicación 1, en el que la deformación plástica se concluye a una temperatura de deformación plástica final; y en donde la temperatura de tratamiento térmico es mayor que la temperatura de deformación plástica final, y menor que la temperatura de transición beta de la aleación de titanio.

40 35. El método de la reivindicación 1, en el que la deformación plástica equivalente de una reducción de área de al menos un 25 % se produce en un intervalo de temperatura de deformación plástica de 18 °F (10 °C) por debajo de la temperatura de transición beta a 400 °F (222 °C) por debajo de la temperatura de transición beta.



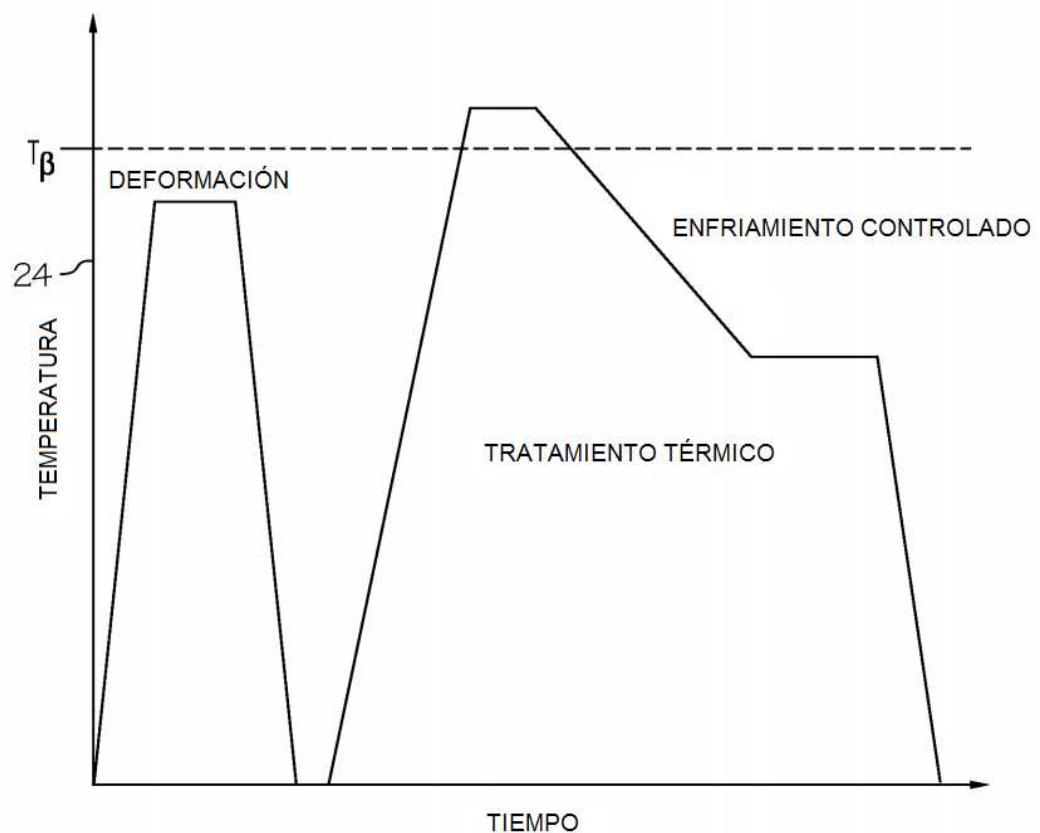


FIG. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

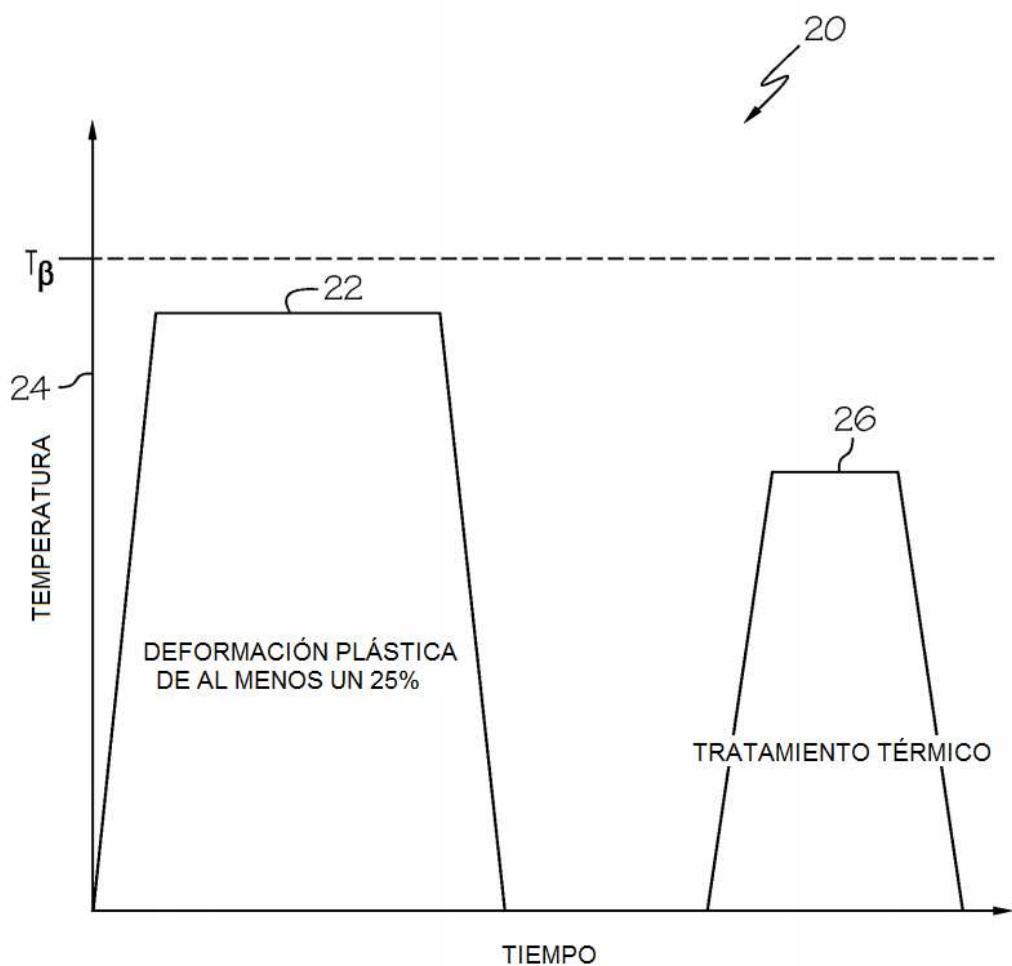


FIG. 3

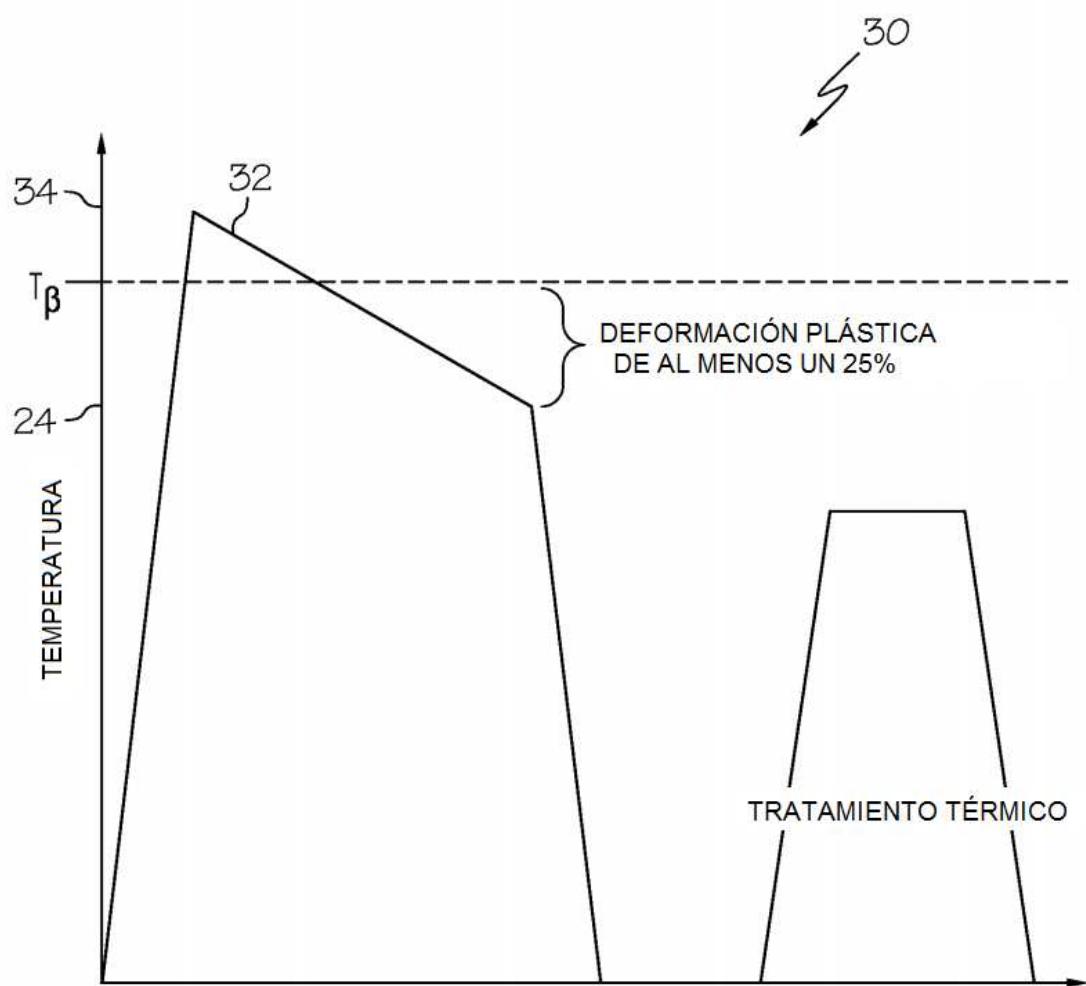


FIG. 4

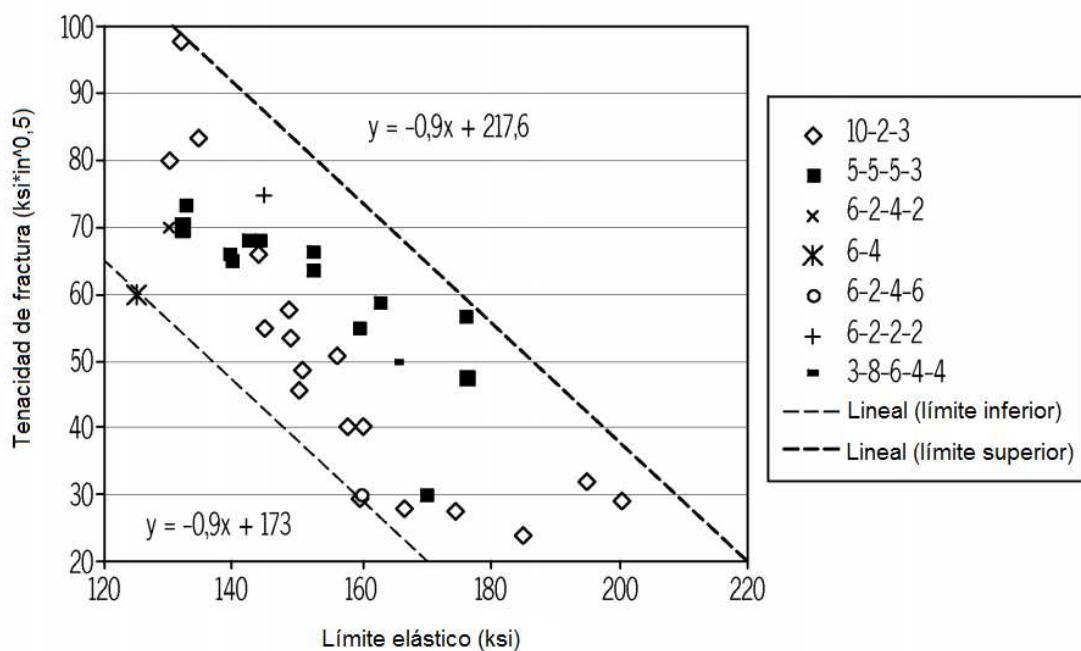


FIG. 5

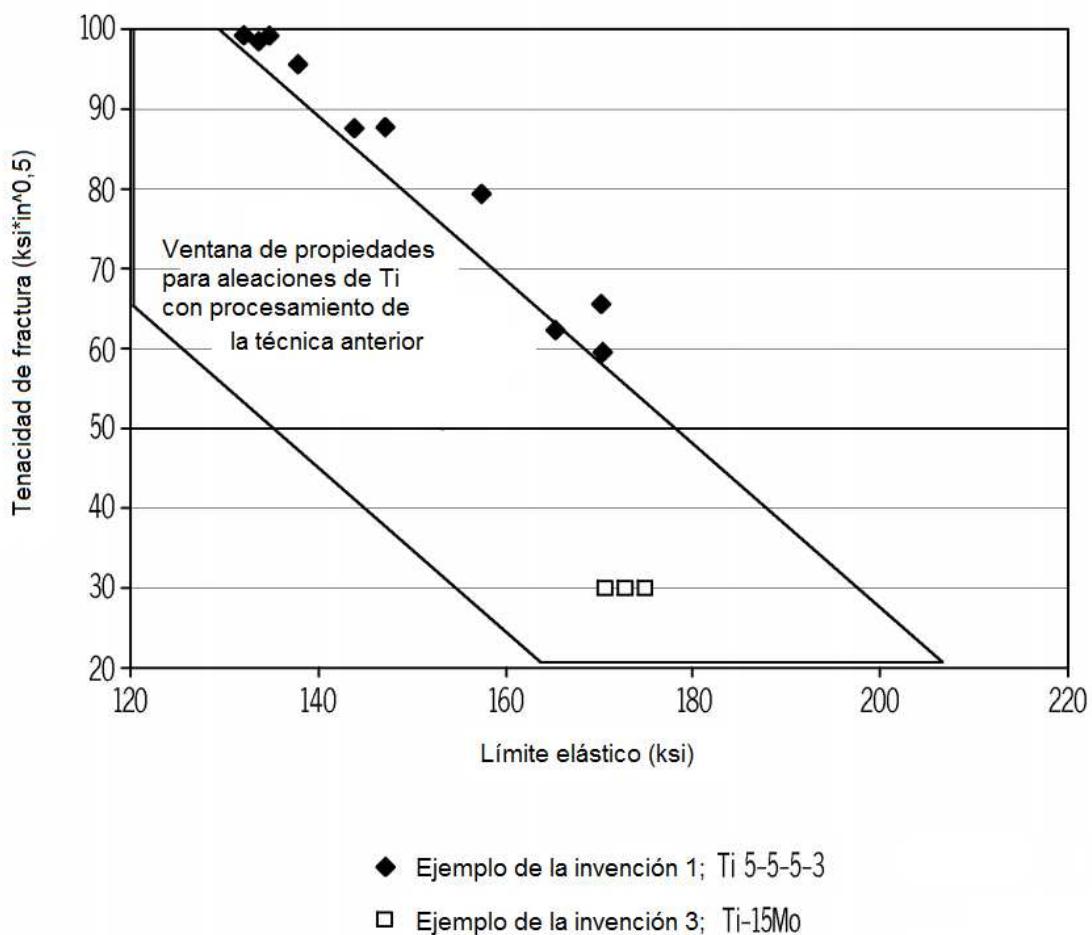


FIG. 6

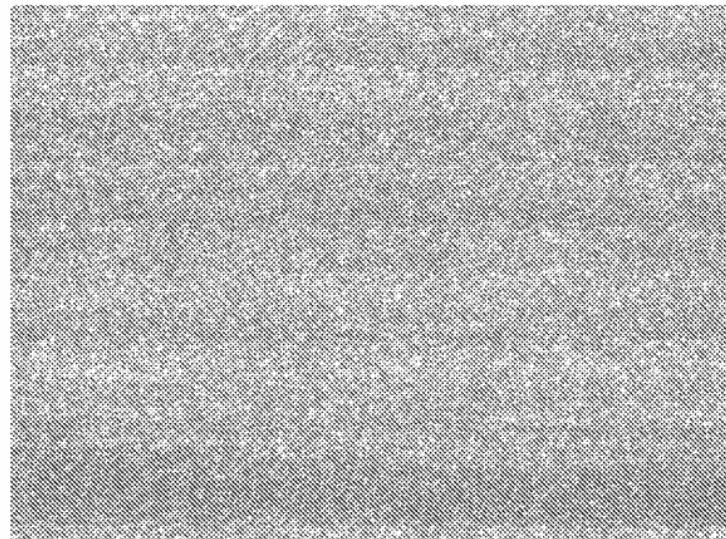


FIG. 7A

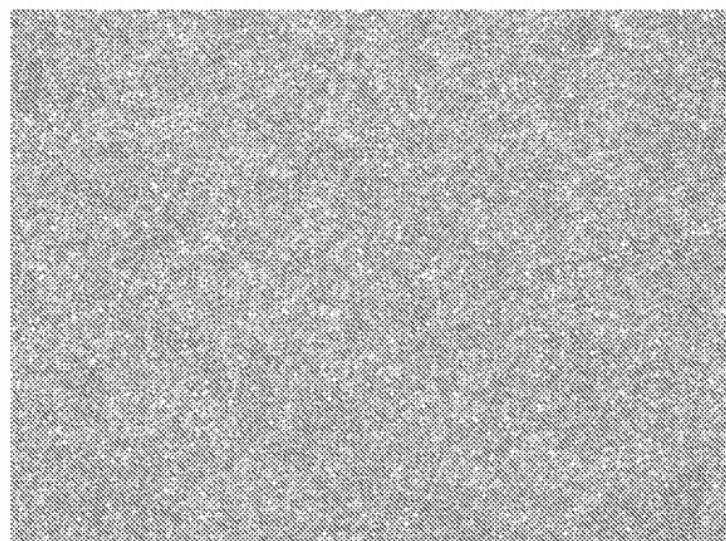


FIG. 7B