(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 665 894**

(51) Int. CI.:

C22F 1/18 (2006.01)
C22C 14/00 (2006.01)
B21B 1/26 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.05.2004 PCT/US2004/013947**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **25.11.2004 WO04101838**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.05.2004 E 04751364 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018 EP 1664364**

(54) Título: **Procesamiento de aleaciones de titanio-aluminio-vanadio y productos fabricados de ese modo**

(30) Prioridad:

09.05.2003 US 434598

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.04.2018

(73) Titular/es:

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

(72) Inventor/es:

HEBDA, JOHN, J.;
HICKMAN, RANDALL, W. y
GRAHAM, RONALD, A.

(74) Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

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

Procesamiento de aleaciones de titanio-aluminio-vanadio y productos fabricados de ese modo

Antecedentes de la invención

Campo de la invención

La presente invención se refiere a métodos novedosos de procesamiento de determinadas aleaciones de titanio que comprenden aluminio, vanadio, hierro y oxígeno, a artículos fabricados usando dichos métodos de procesamiento, y a novedosos artículos que incluyen dichas aleaciones.

Descripción de la invención

Antecedentes

Ya desde el inicio de la década de 1950, se reconoció que el titanio tiene propiedades que lo hacen atractivo para su uso como blindaje estructural frente a proyectiles de armas pequeñas. Se siguió la investigación de aleaciones de titanio para el mismo fin. Una aleación de titanio conocida para su uso como blindaje balístico es la aleación Ti-6Al-4V, que comprende concretamente titanio, 6 por ciento en peso de aluminio, 4 por ciento en peso de vanadio y, normalmente, menos de 0,20 por ciento en peso de oxígeno. Otra aleación de titanio usada en aplicaciones de blindaje balístico incluye 6,0 por ciento en peso de aluminio, 2,0 por ciento en peso de hierro, un contenido de oxígeno relativamente bajo de 0,18 por ciento en peso, menos de 0,1 por ciento en peso de vanadio y posiblemente otros elementos traza. Aún otra aleación de titanio que se ha demostrado adecuada para aplicaciones de blindaje balístico es la aleación de titanio alfa-beta (α-β) de la Patente de los Estados Unidos n.º 5.980.655, expedida el 9 de noviembre de 1999 a Kosaka. Además de titanio, la aleación reivindicada en la patente '655, a la que se denomina en el presente documento la "aleación de Kosaka", incluye, en porcentajes en peso, aproximadamente 2,9 a aproximadamente 5,0 de aluminio, aproximadamente 2,0 a aproximadamente 3,0 de vanadio, aproximadamente 0,4 a aproximadamente 2,0 de hierro, más de 0,2 a aproximadamente 0,3 de oxígeno, aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,03 de carbono, aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,02 de nitrógeno, y menos de aproximadamente 0,5 de otros elementos.

Se ha demostrado que las placas de blindaje formadas a partir de las aleaciones de titanio anteriores satisfacen determinadas normas de V_{50} establecidas por el ejército para denotar el rendimiento balístico. Estas normas incluyen aquellas en, por ejemplo, MIL-DTL-96077F, "Especificación detallada, placa de blindaje y aleaciones de titanio soldables". La V_{50} es la velocidad media de un tipo de proyectil específico que se necesita para penetrar en una placa de aleación que tiene dimensiones específicas y se posiciona con relación al punto de tiro del proyectil de una manera especificada.

Las aleaciones de titanio anteriores se han usado para producir blindaje balístico porque cuando se evalúan frente a muchos tipos de proyectiles, las aleaciones de titanio proporcionan un mejor rendimiento balístico usando menos masa que el acero o el aluminio. A pesar de que determinadas aleaciones de titanio son más "eficientes en masa" que el acero y el aluminio frente a determinadas amenazas balísticas, existe una ventaja significativa para mejorar aún más el rendimiento balístico de las aleaciones de titanio conocidas. Además, el proceso de producción de una placa de blindaje balístico a partir de las aleaciones de titanio anteriores puede ser complicado y costoso. Por ejemplo, la patente '655 describe un método en el que una aleación de Kosaka que se ha procesado termomecánicamente mediante múltiples etapas de forjado a una microestructura α+β mixta se lamina en caliente y se recuece para producir una placa de blindaje balístico de un calibre deseado. La superficie de la placa laminada en caliente desarrolla costra y óxidos a altas temperaturas de procesamiento, y debe estar condicionada por una o más etapas de tratamiento de superficie como molienda, mecanizado, granallado, decapado, etc. Esto complica el proceso de fabricación, lo que da como resultado pérdidas de rendimiento y aumenta el costo de la placa balística terminada.

Dadas las propiedades ventajosas de resistencia a peso de determinadas aleaciones de titanio usadas en aplicaciones de blindaje balístico, sería deseable fabricar artículos distintos de la placa balística de estas aleaciones. Sin embargo, en general se cree que no es posible aplicar fácilmente técnicas de fabricación distintas del simple laminado en caliente a muchas de estas aleaciones de titanio de alta resistencia. Por ejemplo, Ti-6Al-4V en forma de placa se considera de una resistencia demasiado alta para el laminado en frío. Así, la aleación se produce normalmente en forma de chapa a través de un complicado proceso de "laminación de paquetes" en el que dos o más placas de Ti-6Al-4V que tienen un espesor intermedio se apilan y se encierran en una lata de acero. La lata y su contenido se laminan en caliente, y las placas individuales se retiran y se muelen, se decapan y se recortan. El proceso es costoso y puede tener un bajo rendimiento dada la necesidad de moler y decapar las superficies de las chapas individuales. De forma similar, se cree convencionalmente que la aleación de Kosaka tiene una resistencia relativamente alta al flujo a temperaturas por debajo del intervalo de temperatura de laminación α-β. Por tanto, no se conoce que forme artículos distintos a la placa balística de la aleación de Kosaka, y solo se sabe que forma dicha placa usando la técnica de laminado en caliente generalmente descrita en la patente '655. El laminado en caliente es

adecuado para la producción de formas de producto relativamente rudimentarias, y también necesita una aportación de energía relativamente alta.

Considerando la descripción anterior de métodos convencionales de procesamiento de determinadas aleaciones de titanio conocidas para su uso en aplicaciones de blindaje balístico, existe la necesidad de un método para procesar dichas aleaciones a las formas deseadas, incluyendo formas que no sean placas, sin el gasto, la complejidad y la pérdida de rendimiento, y requisitos de aportación de energía de los procesos de trabajo de alta temperatura conocidos.

Sumario

Con el fin de abordar las necesidades descritas anteriormente, la presente divulgación proporciona nuevos métodos de procesamiento de la aleación titanio α-β-aluminio-vanadio descrita y reivindicada en la patente '655, y también describe artículos novedosos que incluyen la aleación de titanio α-β.

Un aspecto de la presente divulgación se refiere a un método para formar un artículo a partir de una aleación de titanio α-β que comprende, en porcentajes en peso, de aproximadamente 2,9 a aproximadamente 5,0 de aluminio, de aproximadamente 2,0 a aproximadamente 3,0 de vanadio, de aproximadamente 0,4 a aproximadamente 2,0 de hierro, de aproximadamente 0,2 a aproximadamente 0,3 de oxígeno, de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,3 de carbono, de aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,02 de nitrógeno, y menos de aproximadamente 0,5 de otros elementos. El método comprende trabajar en frío la aleación de titanio α-β. En determinadas realizaciones, el trabajo en frío puede realizarse con la aleación a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente hasta de aproximadamente 1250 °F (aproximadamente 677 °C). En determinadas otras realizaciones, la aleación α-β se trabaja en frío a una temperatura que oscila entre la temperatura ambiente hasta aproximadamente 1000 °F (aproximadamente 538 °C). Antes del trabajo en frío, la aleación de titanio α-β se puede trabajar opcionalmente a una temperatura superior a aproximadamente 1600 °F (aproximadamente 871 °C) para proporcionar a la aleación una microestructura que propicia la deformación en frío durante el trabajo en frío.

La presente divulgación también se refiere a artículos fabricados por los novedosos métodos descritos en el presente documento. En determinadas realizaciones, un artículo formado por una realización de dichos métodos tiene un espesor de hasta 10,2 cm (4 pulgadas) y muestra propiedades a temperatura ambiente que incluyen resistencia a la tracción de al menos 827 MPa (120 KSI) y resistencia a la tracción final de al menos 896 MPa (130 KSI). Además, en determinadas realizaciones, un artículo formado por una realización de dichos métodos muestra un alargamiento de al menos 10 %.

Los inventores han determinado que cualquier técnica adecuada de trabajo en frío puede adaptarse para su uso con la aleación de Kosaka. En determinadas realizaciones no limitantes, se usan una o más etapas de laminado en frío para reducir el espesor de la aleación. Ejemplos de artículos que pueden fabricarse mediante dichas realizaciones incluyen una chapa, una tira, una lámina y una placa. En el caso de que se usen al menos dos etapas de laminación en frío, el método también puede incluir recocer el intermedio de aleación de etapas sucesivas de laminación en frío para reducir las tensiones dentro de la aleación. En algunas de estas realizaciones, al menos una etapa de laminación en frío sucesiva de recocido intermedio de alivio de tensión puede realizarse en una línea de horno de recocido continuo.

También se divulga en el presente documento un novedoso método de fabricación de una placa de blindaje de una aleación de titanio α-β que incluye, en porcentajes en peso, de aproximadamente 2,9 a aproximadamente 5,0 de aluminio, de aproximadamente 2,0 a aproximadamente 3,0 de vanadio, de aproximadamente 0,4 a aproximadamente 2,0 de hierro, de aproximadamente 0,2 a aproximadamente 0,3 de oxígeno, de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,3 de carbono, de aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,02 de nitrógeno, y menos de aproximadamente 0,5 de otros elementos. El método comprende laminar la aleación a temperaturas significativamente inferiores a las temperaturas usadas convencionalmente para laminar en caliente la aleación para producir la placa de blindaje. En una realización del método, la aleación se lamina a una temperatura no superior a 400 °F (aproximadamente 222 °C) por debajo de la T_β de la aleación.

Un aspecto adicional de la presente invención se refiere a un artículo trabajado en frío de una aleación de titanio α-β, en el que la aleación incluye, en porcentajes en peso, de aproximadamente 2,9 a aproximadamente 5,0 de aluminio, de aproximadamente 2,0 a aproximadamente 3,0 de vanadio, de aproximadamente 0,4 a aproximadamente 2,0 de hierro, de aproximadamente 0,2 a aproximadamente 0,3 de oxígeno, de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,3 de carbono, de aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,02 de nitrógeno, y menos de aproximadamente 0,5 de otros elementos. Ejemplos no limitantes del artículo trabajado en frío incluyen un artículo seleccionado de entre una chapa, una tira, una lámina, una placa, una barra, una varilla, un alambre, un cuerpo hueco tubular, una tubería, un tubo, un paño, una malla, un miembro estructural, un cono, un cilindro, un conducto, una tubería, una boquilla, una estructura de panal de abeja, un sujetador, un remache y una arandela. Algunos de los artículos trabajados en frío pueden tener un espesor superior a 2,5 cm (una pulgada) en propiedades de sección transversal y temperatura ambiente, incluida la resistencia a la tracción de al menos 827 MPa (120 KSI) y la resistencia a la tracción final de al menos 896 MPa (130 KSI). Algunos de los artículos trabajados en frío pueden

tener un alargamiento de al menos 10 %.

Determinados métodos descritos en la presente divulgación incorporan el uso de técnicas de trabajo en frío, que hasta ahora no se creían adecuadas para procesar la aleación de Kosaka. En particular, se creía convencionalmente que la resistencia de la aleación de Kosaka al flujo a temperaturas significativamente por debajo del intervalo de temperatura de laminación en caliente α-β era demasiado grande para permitir que la aleación se trabajase con éxito a dichas temperaturas. Con el descubrimiento inesperado de los presentes inventores de que la aleación de Kosaka puede trabajarse mediante técnicas de trabajo en frío convencionales a temperaturas inferiores a aproximadamente 1250 °F (aproximadamente 677 °C), se hace posible producir un gran número de formas de producto que no son posibles mediante laminado en caliente y/o son significativamente más costosas de producir usando técnicas de trabajo en caliente. Determinados métodos descritos en el presente documento son significativamente menos complicados que, por ejemplo, la técnica convencional de laminación de paquetes descrita anteriormente para producir chapas de Ti-6AI-4V. Además, determinados métodos descritos en el presente documento no implican el alcance de las pérdidas de rendimiento y los altos requisitos de aportación de energía inherentes en procesos que implican trabajar a alta temperatura hasta un calibre y/o forma terminados. Sin embargo, una ventaja adicional es que algunas de las propiedades mecánicas de las realizaciones de la aleación de Kosaka se aproximan o superan a las de Ti-6AI-4V, lo que permite la producción de artículos que no estaban disponibles previamente de Ti-6AI-4V, pero que tienen propiedades similares.

Estas y otras ventajas serán evidentes tras la consideración de la siguiente descripción de las realizaciones de la invención.

Descripción de las realizaciones de la invención

Como se ha indicado anteriormente, la Patente de los Estados Unidos n.º 5.980.655, expedida a Kosaka, describe una aleación de titanio alfa-beta (α-β) y el uso de esa aleación como placa de blindaje balístico. La patente '655 se incorpora en el presente documento en su totalidad como referencia. Además de titanio, la aleación descrita y reivindicada en la patente '655 comprende los elementos de aleación en la Tabla 1 a continuación. Para facilitar la referencia, la aleación de titanio que incluye las adiciones de elementos de aleación en la Tabla 1 se denomina en el presente documento "aleación de Kosaka".

Tabla 1

Elemento de aleación	Porcentaje en peso
Aluminio	de aproximadamente 2,9 a aproximadamente 5,0
Vanadio	de aproximadamente 2,0 a aproximadamente 3,0
Hierro	de aproximadamente 0,4 a aproximadamente 2,0
Oxígeno	más de 0,2 a aproximadamente 0,3
Carbono	de aproximadamente 0,005 a aproximadamente 0,03
Nitrógeno	de aproximadamente 0,001 a aproximadamente 0,02
Otros elementos	menos de aproximadamente 0,5

Como se describe en la patente '655, la aleación de Kosaka puede incluir opcionalmente elementos distintos a los enumerados específicamente en la Tabla 1. Dichos otros elementos, y sus porcentajes en peso, pueden incluir, pero no se limitan necesariamente a, uno o más de los siguientes: (a) cromo, máximo de 0,1 %, generalmente de aproximadamente 0,0001 % a aproximadamente 0,05 %, y preferentemente de hasta aproximadamente 0,03 %; (b) níquel, máximo de 0,1 %, generalmente de aproximadamente 0,001 % a aproximadamente 0,05 %, y preferentemente de hasta aproximadamente 0,02 %; (c) carbono, máximo de 0,1 %, generalmente de aproximadamente 0,005 % a aproximadamente 0,03 %, y preferentemente de hasta aproximadamente 0,01 %; y (d) nitrógeno, máximo de 0,1 %, generalmente de aproximadamente 0,001 % a aproximadamente 0,02 %, y preferentemente de hasta aproximadamente 0,01 %.

Una realización comercial particular de la aleación de Kosaka está disponible en Wah Chang, una compañía Allegheny Technologies Incorporated, que tiene la composición nominal, 4 por ciento en peso de aluminio, 2,5 por ciento en peso de vanadio, 1,5 por ciento en peso de hierro y 0,25 por ciento en peso de oxígeno. Dicha composición nominal se denomina en el presente documento "Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2".

La patente '655 explica que la aleacion de Kosaka se procesa de manera consecuente con el procesamiento termomecánico convencional ("PTM") usado con determinadas otras aleaciones de titanio α-β. En particular, la

patente '655 indica que la aleación de Kosaka está sometida a deformación forjada a temperaturas elevadas por encima de la temperatura del beta transus (T_β) (que es aproximadamente 1800 °F (aproximadamente 982 °C) para Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2), y posteriormente se somete a procesamiento termomecánico forjado adicional por debajo de la T_β. Este procesamiento permite la posibilidad de recristalización beta (es decir temperatura > T_β) del intermedio del ciclo de procesamiento termomecánico α-β.

La patente '655 se refiere particularmente a producir una placa de blindaje balístico de la aleación de Kosaka de una manera que proporcione un producto que incluya una microestructura α+β mixta. Las etapas de procesamiento α + β descritas en la patente son generalmente las siguientes: (1) β forjar el lingote por encima de T_β para formar una plancha intermedia; (2) α-β forjar la plancha intermedia a una temperatura por debajo de la T_β; (3) α-β laminar la plancha para formar una placa y (4) recocer la placa. La patente ´655 enseña que la etapa de calentar el lingote a una temperatura superior a T_β puede incluir, por ejemplo, calentar el lingote a una temperatura de entre aproximadamente 1900 °F a aproximadamente 2300 °F (aproximadamente 1038 °C a aproximadamente 1260 °C). La siguiente etapa de α-β forjar la plancha de calibre intermedio a una temperatura por debajo de T_β puede incluir, por ejemplo, forjar la plancha a una temperatura en el intervalo de temperatura α+β. La patente describe más particularmente α-β forjar la plancha a una temperatura en el intervalo de entre aproximadamente 50 °F a aproximadamente 200 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 111 °C) por debajo de la T_β, tal como de entre aproximadamente 1550 °F a aproximadamente 1775 °F (aproximadamente 843 °C a aproximadamente 968 °C). A continuación, la placa se lamina en caliente en un intervalo de temperatura α-β similar, tal como de aproximadamente 1550 °F a aproximadamente 1775 °F (aproximadamente 843 °C a aproximadamente 968 °C), para formar una placa de un espesor deseado y que tiene propiedades balísticas favorables. La patente '655 describe la siguiente etapa de recocido posterior a la etapa de laminación α-β que se produce a aproximadamente 1300 °F a aproximadamente 1500 °F (aproximadamente 704 °C a aproximadamente 816 °C). En los ejemplos específicamente descritos en la patente '655, las placas de la aleación de Kosaka se formaron sometiendo la aleación a la forja β y α-β, laminación en caliente α-β a 1600 °F (aproximadamente 871 °C) o 1700 °F (aproximadamente 927 °C), y luego recocido de "molino" a aproximadamente 1450 °F (aproximadamente 788 °C). Por consiguiente, la patente '655 enseña la producción de una placa balística a partir de la aleación de Kasaka mediante un proceso que incluye laminación en caliente de la aleación dentro del intervalo de temperatura α-β hasta el espesor deseado.

En el trascurso de la producción de una placa de blindaje balístico a partir de la aleación de Kosaka de acuerdo con el método de procesamiento descrito en la patente '655, los presentes inventores descubrieron inesperada y sorprendentemente que la forja y el laminado se realizaban a temperaturas por debajo de la T_β, lo que dio como resultado un agrietamiento significativamente menor, y las cargas del molino experimentadas durante el laminado a dichas temperaturas fueron sustancialmente menores que para las planchas de tamaño equivalente de aleación de Ti-6AI-4V. En otras palabras, los presentes inventores observaron inesperadamente que la aleación de Kosaka mostraba una resistencia disminuida al flujo a temperaturas elevadas. Sin pretender limitarse a ninguna teoría particular de operación, se cree que este efecto, al menos en parte, se atribuye a una reducción en el refuerzo del material a temperaturas elevadas debido al contenido de hierro y oxígeno en la aleación de Kosaka. Este efecto se ilustra en la siguiente Tabla 2, que proporciona propiedades mecánicas medidas para una muestra de la aleación Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 a diversas temperaturas elevadas.

Tabla 2

Temperatura °C (°F)	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento %
427 (800)	440,6 (63,9)	588,8 (85,4)	22
538 (1000)	322,7 (46,8)	462,0 (67,0)	32
649 (1200)	121,4 (17,6)	237,2 (34,4)	62
760 (1400)	42,7 (6,2)	110,0 (16,1)	130
816 (1500)	21,4 (3,1)	69,0 (10,0)	140

Aunque se observó que la aleación de Kosaka tenía resistencia al flujo reducida a temperaturas elevadas durante el trascurso de la producción de la placa balística del material, se observó que las propiedades mecánicas finales de la placa recocida estaban en el intervalo general de producto de placa similar producido a partir de Ti-6AI -4V. Por ejemplo, la siguiente Tabla 3 proporciona propiedades mecánicas de 26 placas de blindaje balístico laminadas en caliente preparadas a partir de dos lingotes de 363 kg (8.000 lb) de la aleación Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2. Los resultados de la Tabla 3 y otras observaciones de los inventores indican que los productos inferiores a, por ejemplo, aproximadamente un espesor de 6,4 cm (2,5 pulgadas) de sección transversal formados a partir de la aleación de Kosaka mediante los procesos divulgados en el presente documento pueden tener un límite elástico mínimo de 827 MPa (120 KSI), una resistencia a la tracción final mínima de 896 MPa (130 KSI) y un alargamiento mínimo del 12 %. Sin embargo, es posible que los artículos con estas propiedades mecánicas y una sección transversal mucho más grande, tal como inferior a 10,2 cm (4 pulgadas), puedan producirse mediante el trabajo en frío en determinados

molinos de barras a gran escala. Estas propiedades se comparan favorablemente con las de Ti-6Al-4V. Por ejemplo, el Manual de Propiedades de los Materiales, aleaciones de titanio (ASM International, 2ª impresión, enero de 1998) página 526, presenta unas propiedades de tracción a la temperatura ambiente de 876 MPa (127 KSI) de límite elástico, 952 MPa (138 KSI) de resistencia a la tracción final y 12,7 % de alargamiento para Ti-6Al-4V laminado en cruzado a 955 °C (aproximadamente 1777 °F) y recocido en molino. El mismo texto, en la página 524, enumera las propiedades de tracción de Ti-6Al-4V típicas de un límite elástico de 924 MPa (134 KSI), una resistencia a la tracción final de 993 MPa (144 KSI) y un alargamiento del 14 %. Aunque las propiedades de tracción están influenciadas por la forma del producto, la sección transversal, la dirección de medición y el tratamiento térmico, las propiedades presentadas anteriormente para Ti-6Al-4V proporcionan una base para evaluar generalmente las propiedades de tracción relativas de la aleación de Kosaka.

Tabla 3

Propiedades de tracción	
Longitudinal	
Límite elástico	828,1-901,2 MPa (120,1-130,7 KSI)
Resistencia a la tracción final	921/9-986,7 MPa (133,7-143,1 KSI)
Alargamiento	13 %/-19 %
Transversal	
Límite elástico	845,3-999,1 MPa (122,6-144,9 KSI)
Resistencia a la tracción final	923,9-1071,5 MPa (134,0-155,4 KSI)
Alargamiento	15 %/-20 %

Los presentes inventores también han observado que Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 laminado en frío generalmente muestra algo mejor ductilidad que el material Ti-6Al-4V. Por ejemplo, en una secuencia de ensayo que se describe a continuación, el material Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 dos veces laminado en frío y recocido sobrevivió a la flexión del radio de curvatura 2,5T tanto en dirección longitudinal como transversal.

Por tanto, la resistencia reducida observada al flujo a temperaturas elevadas presenta una oportunidad para fabricar artículos a partir de la aleación de Kosaka usando técnicas de trabajo y conformación que previamente no se consideraban adecuadas para su uso con la aleación de Kosaka o Ti-6Al-4V, mientras se conseguían propiedades mecánicas normalmente asociadas con Ti-6Al-4V. Por ejemplo, el trabajo descrito a continuación muestra que la aleación de Kosaka se puede extruir fácilmente a temperaturas elevadas generalmente consideradas "moderadas" en la industria de procesamiento del titanio, que es una técnica de procesamiento que no se sugiere en la patente '655. Teniendo en cuenta los resultados de los experimentos de extrusión a temperatura elevada, otros métodos de conformación de temperatura elevada que se cree que se pueden usar para procesar la aleación de Kosaka incluyen, pero sin limitación, forja en troquel cerrado a alta temperatura, trefilado e hilatura. Una posibilidad adicional es laminar a temperatura moderada u otras temperaturas elevadas para proporcionar una placa o chapa de calibre relativamente ligero, y una tira de calibre fino. Estas posibilidades de procesamiento se extienden sustancialmente más allá de la técnica de laminación en caliente descrita en la patente '655 para producir una placa laminada en caliente, y permiten formas de productos que no pueden producirse fácilmente a partir de Ti-6Al-4V, pero que sin embargo tendrían propiedades mecánicas similares a Ti-6Al-4V.

Los presentes inventores también descubrieron inesperada y sorprendentemente que la aleación de Kosaka tiene un grado sustancial de formabilidad en frío. Por ejemplo, los ensayos de laminado en frío de muestras para ensayo de la aleación Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2, que se describen a continuación, produjeron reducciones de espesor de aproximadamente 37 % antes de que apareciera el agrietamiento del borde por primera vez. Las muestras para ensayo se produjeron inicialmente mediante un proceso similar al proceso de blindaje convencional y en el de una microestructura algo basta. El refinado de la microestructura de las muestras para ensayo mediante el aumento del trabajo α-β y el recocido selectivo de alivio de tensión permitieron reducciones en frío de hasta 44 % antes de que se requiriera recocido de alivio de tensión para permitir una reducción en frío adicional. Durante el trascurso del trabajo de los inventores, también se descubrió que la aleación de Kosaka se podía trabajar en frío a resistencias mucho más altas y aún conservaba cierto grado de ductilidad. Este fenómeno previamente no observado permite la producción de un producto laminado en frío en longitudes de bobina de la aleación de Kosaka, pero con propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V.

La formabilidad en frío de la aleación de Kosaka, que incluye niveles de oxígeno relativamente altos, es contra-intuitiva. Por ejemplo, el titanio de grado 4 CP (puro en el mercado), que incluye un nivel relativamente alto de aproximadamente 0,4 por ciento en peso de oxígeno, muestra un alargamiento mínimo de aproximadamente 15 % y se sabe que es menos conformable que otros grados de CP. Con la excepción de determinados grados de titanio CP, la única aleación de titanio α-β que puede trabajarse en frío producida en un volumen comercial significativo es Ti-3Al-2,5V (concretamente, en porcentaje en peso, 3 de aluminio, 2,5 de vanadio, un máximo de 0,25 de hierro, un máximo de 0,05 de carbono y un máximo de 0,02 de nitrógeno). Los inventores han observado que las realizaciones de la aleación de Kosaka son conformables en frío como Ti-3Al-2,5V pero también muestran propiedades mecánicas más favorables. La única aleación de titanio no-α-β significativa en el mercado que se conforma fácilmente en frío es Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn, que se desarrolló como una alternativa que puede laminarse en frío a la chapa Ti-6Al-4V. Aunque Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn se ha producido como un tubo, una tira, una placa y otras formas, se ha mantenido un producto especializado que no se acerca al volumen de producción de Ti-6Al-4V. La aleación de Kosaka puede ser significativamente menos costosa de fundir y fabricar que las aleaciones de titanio especializadas como Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn.

Dada la trabajabilidad en frío de la aleación de Kosaka y las observaciones de los inventores al aplicar técnicas de trabajo en frío a la aleación, algunas de las cuales se proporcionan a continuación, se cree que numerosas técnicas de trabajo en frío que antes se creían inadecuadas para la aleación de Kosaka pueden usarse para formar artículos de la aleación. En general, "trabajo en frío" se refiere a trabajar una aleación a una temperatura por debajo de la cual la tensión de flujo del material disminuye significativamente. Tal como se usa en el presente documento en relación con la presente invención, "trabajo en frío", "trabajado en frío", "conformación en frío" o términos similares, o "frío" usado en relación con una técnica particular de trabajo o conformación, se refieren al trabajo o a la característica de haber sido trabajado, según sea el caso, a una temperatura no superior a aproximadamente 1250 °F (aproximadamente 677 °C). Preferentemente, dicho trabajo se produce a no más de aproximadamente 1000 °F (aproximadamente 538 °C). Por tanto, por ejemplo, una etapa de laminado realizada en una placa de aleación de Kosaka a 950 °F (510 °C) se considera en el presente documento trabajo en frío. Además, los términos "trabajo" y "conformación" se usan generalmente de manera intercambiable en el presente documento, como lo son los términos "trabajabilidad" y "formabilidad" y términos similares.

Las técnicas de trabajo en frío que se pueden usar con la aleación de Kosaka incluyen, por ejemplo, laminado en frío, trefilado en frío, extrusión en frío, forjado en frío, balanceo/laminado, estampación en frío, hilatura y giro de flujo. Como se conoce en la técnica, el laminado en frío consiste generalmente en pasar artículos previamente laminados en caliente, tales como barras, chapas, placas o una tira, a través de un conjunto de rodillos, a menudo varias veces, hasta que se obtiene un calibre deseado. Dependiendo de la estructura de partida después del laminado (α-β) en caliente,y el recocido, se cree que podría conseguirse al menos una reducción del 35-40 % en el área (RA) laminando en frío una aleación Kosaka antes de que sea necesario un recocido antes de un laminado en frío adicional. Se cree que son posibles reducciones en frío posteriores de al menos 30-60 %, dependiendo del ancho del producto y la configuración del molino.

La capacidad de producir una bobina de calibre fino y una chapa de aleación de Kosaka es una mejora sustancial. La aleación de Kosaka tiene propiedades similares, y, en cierto sentido, mejoradas relativo a las propiedades de Ti-6Al-4V. En particular, las investigaciones realizadas por los inventores indican que la aleación de Kosaka tiene una ductilidad mejorada relativo a Ti-6Al-4V como se demuestra por las propiedades de alargamiento y torsión. Ti-6Al-4V ha sido la principal aleación de titanio en uso durante más de 30 años. Sin embargo, como se indicó anteriormente, la chapa se produce convencionalmente a partir de Ti-6Al-4V, y de muchas otras aleaciones de titanio, mediante un procesamiento complicado y costoso. Debido a que la resistencia de Ti- 6Al-4V es demasiado alta para el laminado en frío y el material, preferentemente la textura se fortalece, dando como resultado propiedades transversales prácticamente sin ductilidad, la chapa Ti-6Al-4V se produce comúnmente en chapas individuales a través de la laminación de paquetes. Las chapas individuales de Ti-6Al-4V requerirían más fuerza del molino que la que pueden producir la mayoría de los molinos laminadores, y el material aún debe estar laminado en caliente. Las chapas individuales pierden calor rápidamente y requerirían recalentamiento después de cada pasada. Por tanto, las chapas/placas de calibre intermedio de Ti-6Al-4V se apilan dos o más altas y se encierran en una lata de acero, que se lamina en su totalidad. Sin embargo, debido a que el modo industrial de enlatado no utiliza sellado al vacío, después del laminado en caliente cada chapa debe ser molida y lijada para eliminar la capa de óxido frágil, que inhibe gravemente la fabricación dúctil. El proceso de molienda introduce marcas de golpe de la grava, que actúan como sitios de inicio de grietas para este material sensible a muescas. Por lo tanto, las chapas también deben ser decapadas para eliminar las marcas de golpe. Además, cada chapa está recortada por todos lados, con 5,1-10,2 cm (2-4 pulgadas) de molduras que se dejan normalmente en un extremo para la sujeción mientras la chapa se muele en una rectificadora de rodillo de arrastre. Normalmente, al menos aproximadamente 0,008 cm (0,003 pulgadas) por superficie se muele, y al menos aproximadamente 0,0025 cm (0,001 pulgadas) por superficie se decapa, dando como resultado una pérdida que es normalmente al menos aproximadamente 0,02 cm (0,008 pulgadas) por chapa. Para chapas de un espesor final de 0,06 cm (0,025 pulgadas), por ejemplo, la chapa laminada a medida debe ser de 0,08 cm (0,033 pulgadas), para una pérdida de aproximadamente 24 % a través de la molienda y el decapado, independientemente de las pérdidas de las molduras. El costo del acero para la lata, el costo de las correas de molienda y los costos de mano de obra asociados con la manipulación de chapas individuales después del laminado de paquetes hace que las chapas que tienen un espesor de 0,1 cm (0,040 pulgadas) o menos sean bastante

costosas.
Por consiguiente, se entenderá que la capacidad para proporcionar una aleación de titanio α-β laminada en frío en forma de bobina continua (Ti-6Al-4V normalmente se produce en tamaños de chapa convencional de 91,44 x 243,84 cm y 121,92 x 304,8 cm (36x96 pulgadas y 48x120 pulgadas) que tienen propiedades mecánicas similares o mejores que Ti-6Al-4V es una mejora sustancial.

Sobre la base de las observaciones de los inventores, el laminado en frío de barras, varillas y alambres en diversos molinos tipo barra, incluyendo molinos tipo Koch, también se puede lograr con la aleación de Kosaka. Ejemplos adicionales de técnicas de trabajo en frío que se pueden usar para formar artículos de la aleación de Kosaka incluyen el laminado (balanceo) de cuerpos huecos tubulares extruidos para la fabricación de tuberías, tubos y conductos sin costura. Sobre la base de las propiedades observadas de la aleación de Kosaka, se cree que se puede conseguir una mayor reducción en el área (RA) en el conformado del tipo de compresión que con la laminación plana. También se puede conseguir el trefilado de varillas, alambres, barras y cuerpos huecos tubulares. Una aplicación particularmente atractiva de la aleación de Kosaka es el trefilado o laminado a cuerpos huecos tubulares para la producción de tubos sin costura, lo que es particularmente difícil de conseguir con la aleación Ti-6Al-4V. El giro de flujo (también denominado en la técnica hilatura por cizallamiento) puede lograrse usando la aleación de Kosaka para producir formas huecas axialmente simétricas que incluyen conos, cilindros, conductos de aeronaves, boquillas y otros componentes de tipo "flujo-dirección". Se puede usar diversas operaciones de conformación del tipo expansivo compresivo y de tipo líquido o de gas, tales como hidroconformación o conformación de protuberancias. La conformación de rodillos de reservas de tipo continuo se puede realizar para formar variaciones estructurales de miembros estructurales genéricos de "ángulo de hierro" o "uni-riostra". Además, sobre la base de los hallazgos de los inventores, las operaciones normalmente asociadas con el procesamiento de chapa metálica, tales como estampado, supresión fina, prensado en troquel, trefilado profundo y acuñación pueden aplicarse a la aleación de Kosaka.

Además de las técnicas de conformado en frío anteriores, se cree que otras técnicas "frías" que pueden usarse para formar artículos de la aleación de Kosaka incluyen, pero no se limitan necesariamente a, forjado, extrusión, giro de flujo, hidroconformado, conformación de protuberancias, conformación de rodillos, estampado, extrusión de impacto, conformación explosiva, conformación de caucho, extrusión posterior, perforación, hilatura, conformación por estirado, flexión por presión, conformación electromagnética y estampado en frío. Los expertos en la técnica, tras considerar las observaciones y conclusiones de los inventores y otros detalles proporcionados en la presente descripción de la invención, pueden comprender fácilmente técnicas adicionales de trabajo en frío/conformación que pueden aplicarse a la aleación de Kosaka. Además, los expertos en la técnica pueden aplicar fácilmente dichas técnicas a la aleación sin excesiva experimentación. Por consiguiente, solo determinados ejemplos de trabajo en frío de la aleación se describen en el presente documento. La aplicación de dichas técnicas de trabajo en frío y conformación puede proporcionar diversos artículos. Dichos artículos incluyen, pero no están necesariamente limitados a los siguientes: una chapa, una tira, una lámina, una placa, una barra, una varilla, un alambre, un cuerpo hueco tubular, una tubería, un tubo, un paño, una malla, un miembro estructural, un cono, un cilindro, un conducto, una tubería, una boquilla, una estructura de panal de abeja, un sujetador, un remache y una arandela.

La combinación de resistencia al flujo inesperadamente baja de la aleación de Kosaka a temperaturas de trabajo elevadas combinada con la capacidad inesperada de trabajar posteriormente en frío la aleación debería permitir una forma de producto de menor costo en muchos casos que el uso de la aleación convencional Ti-6Al-4V para producir los mismos productos. Por ejemplo, se cree que una realización de la aleación de Kosaka que tiene la composición nominal Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 se puede producir en determinadas formas de productos en mayores rendimientos que los de la aleación Ti 6Al-4V debido a la menor superficie y la comprobación de bordes se experimenta con la aleación de Kosaka durante el procesamiento típico α + β de las dos aleaciones. Por tanto, ha sido el caso de que Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 requiere menos molienda superficial y otro acondicionamiento de la superficie puede dar como resultado la pérdida de material. Se cree que en muchos casos el diferencial de rendimiento se demostraría en un grado aún mayor al producir productos terminados a partir de las dos aleaciones. Además, la resistencia al flujo inesperadamente baja de la aleación de Kosaka a temperaturas de trabajo en caliente α-β requeriría un recalentamiento menos frecuente y crearía menos tensión en las herramientas, lo que debería reducir aún más los costos de procesamiento. Además, cuando estos atributos de la aleación de Kosaka se combinan con su inesperado grado de trabajabilidad en frío, se puede disponer de una ventaja de costo sustancial relativo a Ti-4Al-6V dado el requisito convencional de laminado de paquetes en caliente y molienda de la chapa Ti-6Al-4V. La baja resistencia combinada al flujo a temperatura elevada y la trabajabilidad en frío deberían hacer que la aleación de Kosaka sea especialmente adecuada para ser procesada en forma de bobina usando técnicas de procesamiento similares a las usadas en la producción de bobinas de acero inoxidable.

La trabajabilidad en frío inesperada de la aleación Kosaka da como resultado acabados de superficie más finos y una necesidad reducida de acondicionamiento de la superficie para eliminar la escala de superficie pesada y la capa de óxido difuso que normalmente resulta en la superficie de una chapa laminada de paquetes Ti-6Al-4V. Dado el nivel de trabajabilidad en frío que los presentes inventores han observado, se cree que el producto de espesor de lámina en longitudes de bobina puede producirse a partir de la aleación de Kosaka con propiedades similares a las de Ti-6Al-4V.

Ejemplos de los diversos métodos de los inventores para procesar la aleación de Kosaka siguen a continuación.

Ejemplos

A menos que se indique otra cosa, todos los números que expresan cantidades de ingredientes, composición, tiempo, temperaturas etc. en la presente divulgación deben entenderse como modificados en todos los casos por el término "aproximadamente". Por consiguiente, a menos que se indique lo contrario, los parámetros numéricos establecidos en la memoria descriptiva y las reivindicaciones son aproximaciones que pueden variar dependiendo de las propiedades deseadas que se han de obtener mediante la presente invención. Como mínimo, y no en un intento de limitar la aplicación de la doctrina de los equivalentes al alcance de las reivindicaciones, cada parámetro numérico debe interpretarse al menos a la luz del número de dígitos significativos indicados y mediante la aplicación de técnicas de redondeo habituales.

A pesar de que los intervalos numéricos y parámetros que establecen el amplio alcance de la invención sean aproximaciones, los valores numéricos establecidos en los ejemplos específicos se presentan de la forma más precisa posible. Sin embargo, cualquier valor numérico puede contener determinados errores necesariamente resultantes de la desviación estándar encontrada en sus respectivas mediciones de ensayo.

Ejemplo 1

Se preparó una tubería sin costura por extrusión de cuerpos huecos tubulares del calor de la aleación de Kosaka que tiene la composición nominal Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2. La química real medida de la aleación se muestra en la Tabla 4 a continuación:

Tabla 4

Elemento de aleación	Contenido
Aluminio	4,02-4,14 % en peso
Vanadio	2,40-2,43 % en peso
Hierro	1,50-1,55 % en peso
Oxígeno	2300-2400 ppm
Carbono	246-258 ppm
Nitrógeno	95-110 ppm
Silicio	200-210 ppm
Cromo	210-240 ppm
Molibdeno	120-190 ppm

La aleación se forjó a 1700 °F (aproximadamente 927 °C), y luego se forjó rotativamente a aproximadamente 1600 °F (aproximadamente 871 °C). Las T_β calculadas de la aleación fueron aproximadamente 1790 °F (aproximadamente 977 °C). Se extruyeron dos tochos de la aleación forjada en caliente, teniendo cada uno un diámetro exterior de 15,2 cm (6 pulgadas) y un diámetro interno de 5,72 cm (2,25 pulgadas), a cuerpos huecos tubulares que tenían un diámetro exterior de 7,87 cm (3,1 pulgadas) y un diámetro interno de 5,59 cm (2,2 pulgadas). El primer tocho (tocho n.° 1) se extruyó a aproximadamente 788 °C (aproximadamente 1476 °F) y produjo aproximadamente 1,22 m (4 pies) de material satisfactorio para el balanceo para formar una tubería sin costura. El segundo tocho (tocho n.° 2) se extruyó a aproximadamente 843 °C (aproximadamente 1575 °F) y produjo un cuerpo hueco tubular extruido satisfactorio a lo largo de toda su longitud. En cada caso, la forma, las dimensiones y el acabado de la superficie del material extruido indicaron que el material podría trabajarse en frío con éxito mediante laminado o balanceo después del recocido y el acondicionamiento.

Se realizó un estudio para determinar las propiedades de tracción del material extruido después de someterse a diversos tratamientos térmicos. Los resultados del estudio se proporcionan en la Tabla 5 a continuación. Las dos primeras filas de la Tabla 5 enumeran las propiedades medidas para las extrusiones en su forma "como extruido". Las filas restantes se refieren a muestras de cada extrusión que se sometieron a tratamiento térmico adicional y, en algunos casos, un enfriamiento rápido con agua ("EA") o enfriamiento con aire ("EA"). Las últimas cuatro filas enumeran sucesivamente la temperatura de cada etapa de tratamiento térmico empleada.

Tabla 5

Procesamiento	Temp.	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento %
Como extruido (tocho n.º 1)	ND	908,1 (131,7)	1024,6 (184,6)	16
Como extruido (tocho n.º 2)	ND	946,0 (137,2)	1031,5 (149,6)	18
Recocer 4 horas (n.º 1)	1350 °F, 732 °C	873,6 (126,7)	959,8 (139,2)	18
Recocer 4 horas (n.º 2)	1350 °F, 732 °C	857,7 (12,4)	950,8 (137,9)	18
Recocer 4 horas (n.º 1)	1400 °F, 760 °C	864,6 (125,4)	957,7 (138,9)	19
Recocer 4 horas (n.º 2)	1400 °F, 760 °C	861,2 (124,9)	959,8 (139,2)	19
Recocer 1 hora (n.º 1)	1400 °F, 760 °C	857,7 (124,4)	955,6 (138,6)	18
Recocer 1 hora (n.º 2)	1400 °F, 760 °C	875,7 (127,0)	963,9 (139,8)	18
Recocer 4 horas (n.º 1)	1450 °F, 788 °C	880,5 (127,7)	968,7 (140,5)	18
Recocer 4 horas (n.º 2)	1450 °F, 788 °C	863,9 (125,3)	958,4 (139,0)	19
Recocer 1 hora + EA (n.º 1)	1700 °F, 924 °C	ND	1292,1 (187,4)	12
Recocer 1 hora + EA (n.º 2)	1700 °F, 927 °C	1118,4 (162,2)	1299,7 (188,5)	15
Recocer 1 hora + EA + 8 horas. + EA (n.º 1)	1700 °F, 927 °C 1000 °F, 538 °C	1085,3 (157,4)	1210,1 (175,5)	13
Recocer 1 hora + EA + 8 horas. + EA (n.º 2)	1700 °F, 927 °C 1000 °F, 538 °C	1099,8 (159,5)	1226,6 (177,9)	9
Recocer 1 hora + EA + 1 hora EA (n.º 1)	1700 °F, 927 °C 1400 °F, 760 °C	922,6 (133,8)	1017,0 (147,5)	19
Recocer 1 hora + EA + 1 hora, EA (n.º 2)	1700 °F, 927 °C 1400 °F, 760 °C	912,9 (132,4)	1007,4 (146,1)	18

Los resultados de la Tabla 5 muestran resistencias comparables a la placa laminada en caliente y recocida, así como a las reservas planas de precursores que posteriormente se laminaron en frío. Todos los resultados de la Tabla 5 para el recocido de 1350 °F (aproximadamente 732 °C) hasta 1450 °F (aproximadamente 788 °C) durante los tiempos enumerados (denominado en el presente documento "recocido del molino") indican que las extrusiones pueden fácilmente reducirse en frío al tubo a través de balanceo o laminado o trefilado. Por ejemplo, los resultados de tracción se comparan favorablemente con los resultados obtenidos por los inventores de laminación en frío y recocido de Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2, y también del trabajo anterior de los inventores con la aleación Ti-3Al-2,5V, que convencionalmente se extruye a tubos.

Los resultados de la Tabla 5 para las muestras enfriadas y envejecidas con agua (denominadas "STE" para "solución tratada y envejecida") muestran que el tubo balanceado/laminado en frío producido a partir de las extrusiones podría tratarse posteriormente con calor para obtener resistencias mucho más altas, mientras mantiene cierta ductilidad residual. Estas propiedades de STE son favorables en comparación con las de Ti-6Al-4V y las variantes de grado inferior.

Ejemplo 2

Se prepararon tochos adicionales de la aleación de Kosaka forjada en caliente de la Tabla 5 descrita anteriormente y se extruyeron con éxito a cuerpos huecos tubulares. Se utilizaron dos tamaños de tochos de entrada para obtener dos tamaños de tubos extruidos. Los tochos mecanizados de un diámetro exterior de 17 cm (6,69 pulgadas) y un

diámetro interno de 6,48 cm (2,55 pulgadas) se extruyeron a un diámetro exterior nominal de 8,6 cm (3,4 pulgadas) y un diámetro interno de 6,32 cm (2,488 pulgadas). Los tochos mecanizados de un diámetro exterior de 15,34 cm (6,04 pulgadas) y un diámetro interno de 5,72 cm (2,25 pulgadas) se extruyeron a un diámetro exterior nominal de 7,87 cm (3,1 pulgadas) y un diámetro interno de 5,72 cm (2,25 pulgadas). La extrusión se produjo en un punto de objetivo de 1450 °F (aproximadamente 788 °C), con un máximo de 1550 °F (aproximadamente 843 °C). Este intervalo de temperatura se seleccionó de modo que la extrusión tuviera lugar a una temperatura por debajo de la T_β calculada (aproximadamente 1790 °F, 977 °C) pero también suficiente para conseguir un flujo de plástico.

Los tubos extruidos mostraron una calidad de superficie y un acabado de superficie favorables, estaban libres de traumatismo superficial visible, tenían una forma redonda y un espesor de pared generalmente uniforme, y tenían dimensiones uniformes a lo largo de su longitud. Estas observaciones, tomadas en combinación con los resultados de tracción de la Tabla 5 y la experiencia de los inventores con el laminado en frío del mismo material, indican que las extrusiones tubulares pueden procesarse adicionalmente mediante trabajo en frío para tubos que cumplan los requisitos comerciales.

Ejemplo 3

Varias muestras para ensayo de la aleación de titanio α-β de la Tabla 5 forjadas en caliente como se describe en el Ejemplo 1 anterior se laminaron a aproximadamente 0,572 cm (0,225 pulgadas) de espesor en el intervalo α-β a una temperatura de 50-150 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C) por debajo de la T_β calculada. La experimentación con la aleación indicó que el laminado en el intervalo α-β seguido de un recocido de molino produjo los mejores resultados de laminado en frío. Sin embargo, se prevé que, dependiendo de los resultados deseados, la temperatura de laminación podría estar en el intervalo de temperaturas por debajo de la T_β hasta el intervalo de recocido del molino.

Antes de la laminación en frío, las muestras para ensayo se recocieron en molino, y luego se chorrearon y decaparon para que estuvieran libres de una caja y de una superficie enriquecida con oxígeno o estabilizada. Las muestras para ensayo se laminaron en frío a temperatura ambiente, sin aplicación de calor externo. (Las muestras se calentaron a través del trabajo adiabático a aproximadamente 200-300 °F (aproximadamente 93 °C a aproximadamente 149 °C), lo que no se considera metalúrgicamente significativo.) Las muestras laminadas en frío se recocieron posteriormente. Varias de las muestras para ensayo recocidas de 0,572 cm (0,225 pulgadas) de espesor se laminaron en frío a un espesor de aproximadamente 0,363 cm (0,143 pulgadas), una reducción de aproximadamente 36 %, a través de varios pases de rodillo. Dos de las muestras para ensayo de 0,363 cm (0,143 pulgadas) se recocieron durante 1 hora a 1400 °F (760 °C) y luego se laminaron en frío a temperatura ambiente, sin la aplicación de calor externo, a aproximadamente 0,194 cm (0,0765 pulgadas), una reducción de aproximadamente el 46 %.

Durante el laminado en frío de las muestras de mayor espesor, se observaron reducciones de 0,002-0,008 cm (0,001 a 0,003 pulgadas) por pasada. En calibres más delgados, así como cerca de los límites de la reducción en frío antes de que se requiriera recocido, se observó que se necesitaban varios pases antes de conseguir una reducción de tan solo 0,002 cm (0,001 pulgadas). Como será evidente para un experto en la técnica, la reducción de espesor alcanzable por pasada dependerá en parte del tipo de molino, la configuración del molino, el diámetro del rodillo de trabajo, así como de otros factores. Las observaciones del laminado en frío del material indican que podrían conseguirse fácilmente reducciones finales de al menos aproximadamente 35-45 % antes de la necesidad de recocido. Las muestras se laminaron en frío sin traumatismos o defectos observables, excepto por un ligero agrietamiento en el borde que se produjo en el límite de la ductilidad práctica del material. Estas observaciones indicaron la adecuabilidad de la aleación α-β de kosaka para el laminado en frío.

Las propiedades de tracción de las muestras para ensayo de calibre intermedio y final se proporcionan en la Tabla 6. Estas propiedades se comparan favorablemente con las propiedades de tracción necesarias para el material Ti-6Al-4V como se establece en las especificaciones industriales convencionales tales como: AMS 4911H (Especificación de Materiales Aeroespaciales, Aleaciones de Titanio, Chapa, Tira y Placa de 6A1-4V Recocido); MIL-T-9046J (Tabla III); y DMS 1592C.

Tabla 6

	Longitudinal			Transversal		
Espesor del material cm (pulgadas)	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento (%)	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento (%)
0,363 (0,143)	865,3 (125,5)	978,4 (141,9)	15	1057,7 (153,4)	1091,5 (158,3)	16

0,363 (0,143)	870,8 (126,3)	985,3 (142,9)	15	1054,2 (152,9)	1088,6 (157,6)	16
0,363 (0,143)	863,9 (125,3)	978,4 (141,9)	15	1049,4 (152,2)	1085,3 (157,4)	16
0,194 (0,0765)	866,0 (1256,6)	1006,0 (149,9)	14	1036,3 (150,3)	1084,6 (157,3)	14
0,194 (0,0765)	868,1 (125,9)	1008,7 (146,3)	14	1034,9 (150,1)	1081,8 (156,9)	15

Las propiedades de torsión de las muestras para ensayo recocidas se evaluaron de acuerdo con la norma ASTM E 290. Dichos ensayos consistieron en colocar una muestra para ensayo plana sobre dos rodillos estacionarios y luego empujar la muestra para ensayo entre los rodillos con un mandril de un radio basado en el espesor del material hasta que se obtiene un ángulo de curvatura de 105°. La muestra fue luego examinada para detectar agrietamiento. Las muestras laminadas en frío mostraron la capacidad de doblarse en radios más estrechos (normalmente un radio de curvatura alcanzado de 3E, o en algunos casos 2E, en los que "E" es el espesor de la muestra) que es típico para el material Ti-6AI-4V, mientras que también muestran niveles de resistencia comparables a Ti-6Al-4V. Basándose en las observaciones de los inventores de esta y otros ensayos de flexión, se cree que muchos artículos laminados en frío formados de la aleación de Kosaka pueden doblarse alrededor de un radio de 4 veces el espesor del artículo o menos sin fallo del artículo.

Las observaciones de laminación en frío y los ensayos de propiedades de resistencia y flexión en este ejemplo indican que la aleación de Kosaka puede procesarse en una tira laminada en frío, y también puede reducirse a un producto de calibre muy fino, tal como una lámina. Esto se confirmó en ensayos adicionales por los inventores en los que una aleación de Kosaka que tiene la química del presente ejemplo se laminó con éxito en frío en un molino Sendzimir a un espesor de 0,028 cm (0,011 pulgadas) o menos.

Ejemplo 4

Se preparó una placa de una aleación de Kosaka procesada α-β que tiene la química de la Tabla 4 anterior laminando en cruzado la placa a aproximadamente 1735 °F (aproximadamente 946 °C), que está en el intervalo de 50-150 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C) inferior a la T_β. La placa se laminó en caliente a 1715 °F (aproximadamente 935 °C) desde un espesor nominal de 2,5 cm (0,980 pulgadas) a un espesor nominal de 0,559 cm (0,220 pulgadas). Para investigar qué parámetros intermedios de recocido proporcionan las condiciones adecuadas para la posterior reducción en frío, la placa se cortó en cuatro secciones individuales (n.° 1 a n.°4) y las secciones se procesaron como se indica en la Tabla 7. Cada sección se recoció primero durante aproximadamente una hora y luego se sometió a dos etapas de laminado en frío (LF) con un recocido intermedio que dura aproximadamente una hora.

Tabla 7

Sección	**Procesamiento**	**Calibre final cm (pulgadas)**
n.° 1	recocido a 1400 °F (760 °C)/LF/recocido a1400 °F (760 °C)/LF	0,175 (0,069)
n.° 2	recocido a 1550 °F (aproximadamente 843 °C)/LF/recocido a1400 °F (760 °C)/LF	0,168 (0,066)
n.° 3	recocido a 1700 °F (aproximadamente 927 °C)/LF/recocido a1400 °F (760 °C)/LF	0,198 (0,078)
n.° 4	recocido a 1800 °F (aproximadamente 982 °C)/LF/recocido a1400 °F (760 °C)/LF	ND

Durante las etapas de laminación en frío, se realizaron pases de laminación hasta la primera verificación de bordes observables, que es una indicación temprana de que el material se está acercando al límite de la trabajabilidad práctica. Como se vio en otros ensayos de laminación en frío con la aleación de Kosaka por los inventores, la reducción inicial en frío en los ensayos de la Tabla 7 fue del orden del 30-40 %, y más normalmente fue del 33-37 %. El uso de parámetros de una hora a 1400 °F (760 °C) para el recocido antes de la reducción en frío y el recocido intermedio proporcionó resultados adecuados, aunque el procesamiento aplicado a las otras secciones en la Tabla 7 también funcionó bien.

Los inventores también determinaron que el recocido durante cuatro horas a 1400 °F (760 °C), o bien a 1350 °F (aproximadamente 732 °C) o a 1450 °F (aproximadamente 787 °C) durante un tiempo equivalente, también transmitió sustancialmente la misma capacidad en el material para la posterior reducción en frío y propiedades mecánicas ventajosas, tales como los resultados de tracción y flexión. Se observó que incluso temperaturas más altas, tales como en el "intervalo de solución" de 50-150 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C)

inferior a la T_β, parecían endurecer el material y dificultar la posterior reducción en frío. El recocido en el campo β, $T>T_\beta$, no produjo ninguna ventaja para la reducción en frío posterior.

Ejemplo 5

Se preparó una aleación de Kosaka que tenía la siguiente composición: 4,07 % en peso de aluminio; 229 ppm de carbono; 1,69 % en peso de hierro; 86 ppm de hidrógeno; 99 ppm de nitrógeno; 2100 ppm de oxígeno y 2,60 % en peso de vanadio. La aleación se procesó forjando inicialmente un lingote VAR de un diámetro de 76,2 cm (30 pulgadas) de la aleación a 2100 °F (aproximadamente 1149 °C) a una sección transversal de 50,8 cm (20 pulgadas) de espesor nominal por 73,7 cm (29 pulgadas) de ancho, que a su vez se forjó en 1950 °F (aproximadamente 1066 °C) a una sección transversal de 25,4 cm (10 pulgadas) de espesor nominal por 73,7 cm (29 pulgadas) de ancho. Después de la molienda/acondicionado, el material se forjó a 1835 °F (aproximadamente 1002 °C) (todavía por encima de la T_β de aproximadamente 1790 °F (aproximadamente 977 °C)) a una plancha de 11,4 cm (4,5 pulgadas) de espesor nominal, que fue posteriormente acondicionado por molienda y decapado. Una sección de la plancha se laminó a 1725 °F (aproximadamente 941 °C), aproximadamente 65 °F (aproximadamente 36 °C) por debajo de la T_β, a un espesor de aproximadamente 5,3 cm (2,1 pulgadas) y se recoció. Una pieza de 30,5 x 38,1 cm (12 x 15 pulgadas) de la placa de 5,3 cm (2,1 pulgadas) fue luego laminada en caliente a una banda caliente de un espesor nominal de 0,51 cm (0,2 pulgadas). Después de recocer a 1400 °F (760 °C) durante una hora, la pieza se chorreó y se decapó, se laminó en frío hasta aproximadamente 0,363 cm (0,143) pulgadas de espesor, se recoció con aire a 1400 °F (760 °C) durante una hora y se acondicionó. Como es sabido en la técnica, el acondicionamiento puede incluir uno o más tratamientos superficiales, tales como chorreo, decapado y molienda, para eliminar la escala superficial, el óxido y los defectos. La banda se laminó en frío de nuevo, esta vez a aproximadamente 0,198 cm (0,078 pulgadas) de espesor, y se recoció y acondicionó de forma similar, y se volvió a laminar hasta aproximadamente 0,114 cm (0,045 pulgadas) de espesor.

Al laminar hasta 0,198 cm (0,078 pulgadas) de espesor, la chapa resultante se cortó en dos piezas para facilitar su manejo. Sin embargo, para realizar ensayos adicionales en el equipo que requieren una bobina, las dos piezas se soldaron juntas y las colas se unieron a la tira. La química del metal de soldadura era sustancialmente la misma que la del metal base. La aleación podía soldarse usando medios tradicionales para aleaciones de titanio, proporcionando un depósito de soldadura dúctil. A continuación, la tira se laminó en frío (la soldadura no se laminó) para proporcionar una tira de 0,114 cm (0,045 pulgadas) de espesor nominal, y se recoció en un horno de recocido continuo a 1425 °F (aproximadamente 774 °C) a una velocidad de alimentación de 0,51 cm/s (1 pie/minuto). Como es sabido, un recocido continuo se logra moviendo la tira a través de una zona caliente dentro de una atmósfera semi-protectora que incluye argón, helio, nitrógeno, o algún otro gas que tenga una reactividad limitada a la temperatura de recocido. La atmósfera semiprotectora está destinada a impedir la necesidad de chorrear y luego decapar fuertemente la tira recocida para eliminar el óxido profundo. Un horno de recocido continuo se usa convencionalmente en el procesamiento a escala comercial y, por lo tanto, el ensayo se llevó a cabo para simular la producción de una tira en espiral a partir de una aleación de Kosaka en un entorno de producción comercial.

Se recogieron muestras de una de las secciones unidas recocidas de la tira para la evaluación de las propiedades de tracción, y la tira se laminó entonces en frío. Una de las secciones unidas se laminó en frío desde un espesor de aproximadamente 0,104 cm (0,041 pulgadas) a aproximadamente 0,056 cm (0,022 pulgadas), una reducción del 46 %. La sección restante se laminó en frío desde un espesor de aproximadamente 0,107 cm (0,042 pulgadas) a aproximadamente 0,061 cm (0,024 pulgadas), una reducción del 43 %. El laminado se interrumpió cuando apareció una grieta de borde repentina en cada sección unida.

Después del laminado en frío, la tira se re-dividió en la línea de soldadura en dos tiras individuales. La primera sección de la tira se recoció entonces en la línea de recocido continuo a 1425 °F (aproximadamente 774 °C) a una velocidad de alimentación de 0,51 cm/s (1 pie/minuto). Las propiedades de tracción de la primera sección recocida de la tira se proporcionan a continuación en la Tabla 8, habiéndose ejecutado cada ensayo por duplicado. Las propiedades de tracción en la Tabla 8 fueron sustancialmente las mismas que las de las muestras recogidas de la primera sección de la tira después del recocido continuo inicial y antes de la primera reducción en frío. Que todas las muestras tuvieran propiedades de tracción favorables similares indica que la aleación puede recocerse continuamente de manera eficaz.

Tabla 8

	Longitudinal			Transversal		
Ejecución de ensayo	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento (%)	Límite elástico MPa (KSI)	Resistencia a la tracción final MPa (KSI)	Alargamiento (%)
n.° 1	903,9 (131,1)	1032,2 (149,7)	14	1054,9 (153,0)	1108,7 (160,8)	10

n.° 2	906,0 (131,4)	1037,0 (150,4)	12	1052,2 (152,6)	1103,2 (160,0)	12

Los resultados de laminación en frío conseguidos en este ejemplo fueron muy favorables. El recocido continuo ablandó adecuadamente el material para una reducción en frío adicional a un calibre delgado. El uso de un molino Sendzimir, que aplica presión de manera más uniforme a lo ancho de la pieza de trabajo, puede aumentar el posible laminado en frío antes de la necesidad de recocido.

Ejemplo 6

Se proporcionó una sección de un tocho de aleación de Kosaka que tiene la química mostrada en la Tabla 4 y se procesó de la siguiente manera hacia el extremo de la producción de alambre. El tocho se forjó en una prensa de forjado a aproximadamente 1725 °F (aproximadamente 941 °C) a una barra redonda de aproximadamente 7 cm (2,75 pulgadas) de diámetro, y luego se forjó en una forja giratoria para redondearlo.

La barra fue luego forjada/estampada en una pequeña estampadora giratoria en dos etapas, cada una a 1625 °F (885 °C), primero a 3,18 cm (1,25 pulgadas) de diámetro y luego a 1,91 cm (0,75 pulgadas) de diámetro. Después del chorreado y el decapado, la varilla se redujo a la mitad y la otra mitad se estampó a aproximadamente 1,27 cm (0,5 pulgadas) a una temperatura por debajo del rojo. La varilla de 1,27 cm (0,5 pulgadas) se recoció durante 1 hora a 1400 °F (760 °C).

El material fluyó muy bien durante el estampado, sin traumatismo superficial. El examen microestructural reveló una estructura sólida, sin vacíos, porosidad u otros defectos. Una primera muestra del material recocido se ensayó para determinar las propiedades de tracción y mostró un límite elástico de 871,5 MPa (126,4 KSI), una resistencia a la tracción final de 1016,3 MPa (147,4 KSI) y un alargamiento total del 18 %. Una segunda muestra de barra recocida mostró un límite elástico de 865,3 MPa (125,5 KSI), una resistencia a la tracción final de 1012,2 MPa (146,8 KSI) y un alargamiento total del 18 %. Por tanto, las muestras mostraron rendimientos y resistencias a la tracción finales similares a Ti-6AI-4V, pero con ductilidad mejorada. El aumento de la trabajabilidad mostrada por la aleación de Kosaka en comparación con otras aleaciones de titanio de resistencia similar, aleaciones que también requerían un mayor numero de etapas de calor y trabajo intermedias y la molienda adicional para eliminar los defectos superficiales del traumatismo de procesamiento termomecánico, representa un avance significativo.

Ejemplo 7

Como se ha tratado anteriormente, la aleación de Kosaka se desarrolló originalmente para uso como placa de blindaje balístico. Con la observación inesperada de que la aleación puede trabajarse en frío fácilmente y de que muestra una ductilidad significativa en la condición de trabajada en frío a niveles de resistencia más altos, los inventores determinaron investigar si el trabajo en frío afecta el rendimiento balístico.

Se preparó una placa de 2,1 pulgadas (aproximadamente 50 mm) de espesor de una aleación de Kosaka α-β procesada que tenía la química mostrada en la Tabla 4 como se describe en el Ejemplo 5. La placa se laminó en caliente a 1715 °F (935 °C) a un espesor de aproximadamente 2,77 cm (1,090 pulgadas). La dirección de laminación era normal a la dirección de laminación anterior. La placa se recoció en aire a aproximadamente 1400 °F (760 °C) durante aproximadamente una hora y luego se chorreó y se decapó. La muestra se laminó luego a aproximadamente 1000 °F (aproximadamente 538 °C) a 2,13 cm (0,840 pulgadas) de espesor y se cortó en mitades. Una sección fue conservada en condición laminada. La sección restante se recoció a 1690 °F (aproximadamente 921 °C) durante aproximadamente una hora y se enfrió con aire. Las T_β calculadas del material fueron 1790 °F (aproximadamente 977 °C)). Ambas secciones se chorrearon y caparon y se enviaron para ensayos balísticos. Se envió un "remanente" de material de espesor equivalente del mismo lingote para ensayos balísticos. El remanente se había procesado de una manera convencional usada para la producción de una placa de blindaje balístico, mediante un laminado en caliente, un recocido de solución y un recocido de molino a aproximadamente 1400 °F (760 °C) durante al menos una hora. El recocido de solución normalmente se realiza a 50-150 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C) por debajo de la T_β.

El laboratorio de ensayos evaluó las muestras frente a un proyectil de simulación de fragmentos (PSF) de 20 mm y una ronda B32 API de 14,5 mm, según MIL-DTL-96077F. No se notó ninguna diferencia discernible en los efectos de las rondas de 14,5 mm en cada una de las muestras, y todas las piezas de ensayo fueron completamente penetradas por las rondas de 14,5 mm a velocidades de 911 a 920 m/s (2990 a 3018 pies por segundo (pps)). Los resultados con las rondas PSF de 20 mm se muestran en la Tabla 10 (MIL-DTL-96077F, la V_{50} requerida es de 771 m/s (2529 pps)).

Tabla 10

Material	Calibre cm (pulgadas)	V_{50} m/s (pps)	Disparos
Laminado + recocido de 1000 °F (aproximadamente 538 °C)	2,106 (0,829)	866,55 (2843)	4
Laminado de 1000 °F (aproximadamente 538 °C) sin recocido	2,108 (0,830)	ND	3
Laminado caliente + recocido (convencional)	2,164 (0,852)	847,95 (2782)	4

Como se muestra en la Tabla 10, el material laminado a 1000 °F (aproximadamente 538 °C) seguido de un recocido de "intervalo de solución" (nominal 1 hora a 1690 °F (aproximadamente 921 °C) y enfriado con aire) tuvo un rendimiento significativamente mejor frente a las rondas de PSF que el material laminado a 1000 °F (aproximadamente 538 °C) que no fue posteriormente recocido, y frente al material que fue laminado en caliente y recocido de una manera convencional para el blindaje balístico formado a partir de la aleación de Kosaka. Por tanto, los resultados de la Tabla 10 indican que la utilización de temperaturas de laminación significativamente inferiores a las temperaturas de laminación convencionales durante la producción de la placa de blindaje balístico de la aleación Kosaka puede conducir a un mejor rendimiento balístico PSF.

Por consiguiente, se determinó que la V50 del rendimiento balístico de una placa de aleación de Kosaka que tiene la composición nominal Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-,25O_2 con rondas PSF 20 mm fue mejorada en el orden de 15,2-30,5 m/s (50-100 pps) aplicando un novedoso procesamiento termo-mecánico. En una forma, el novedoso procesamiento termo-mecánico implicaba primero el uso de laminación en caliente relativamente normal por debajo de la T_β a temperaturas de trabajo en caliente convencionales α+β (normalmente, 50-150 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C) por debajo de la T_β) de tal manera que se obtenga una tensión casi igual en las orientaciones longitudinales y transversales largas de la placa. A continuación se aplicó un recocido intermedio del molino a aproximadamente 1400 °F (760 °C) durante aproximadamente una hora. La placa se laminó luego a una temperatura significativamente más baja que la que se usa convencionalmente para la placa de blindaje de laminado en caliente de la aleación de Kosaka. Por ejemplo, se cree que la placa puede laminarse a 400-700 °F (222 °C a aproximadamente 389 °C) por debajo de la T_β, o a una temperatura más baja, temperaturas mucho más bajas de lo que se creía posible para su uso con la aleación de Kosaka. La laminación puede usarse para conseguir, por ejemplo, una reducción del 15-30 % en el espesor de la placa. Después de dicha laminación, la placa puede recocerse en el intervalo de temperatura de la solución, normalmente 50-100 °F (aproximadamente 28 °C a aproximadamente 83 °C) por debajo de la T_β, durante un periodo de tiempo adecuado, que puede ser, por ejemplo, en el intervalo de 50 a 240 minutos. La placa recocida resultante se puede terminar a continuación mediante combinaciones de operaciones típicas de acabado de placas metálicas para eliminar la caja del material alfa (α). Dichas operaciones de acabado pueden incluir, pero sin limitación, chorreo, decapado con ácido, molienda, mecanizado, pulido y lijado, por lo que se produce un acabado superficial liso para optimizar el rendimiento balístico.

Debe entenderse que la presente descripción ilustra aquellos aspectos de la invención relevantes para una comprensión clara de la invención. Determinados aspectos de la invención que serían evidentes para los expertos en la técnica y que, por lo tanto, no facilitarían una mejor comprensión de la invención, no se han presentado con el fin de simplificar la presente descripción. Aunque se han descrito las realizaciones de la presente invención, un experto habitual en la técnica, tras considerar la descripción anterior, reconocerá que pueden emplearse muchas modificaciones y variaciones de la invención. Todas las variaciones y modificaciones de la invención pretenden estar cubiertas por la descripción anterior y las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un método para formar un artículo a partir de una aleación de titanio α-β que consiste en, en porcentajes en peso, de 2,9 a 5,0 de aluminio, de 2,0 a 3,0 de vanadio, de 0,4 a 2,0 de hierro, de 0,2 a 0,3 de oxígeno, de 0,005 a 0,3 de carbono, de 0,001 a 0,02 de nitrógeno, menos de 0,5 de otros elementos, el resto titanio e impurezas accidentales, comprendiendo el método:

trabajar en frío la aleación de titanio α-β a una temperatura de hasta menos de 677 °C (1250 °F).

2. El método de la reivindicación 1, en el que antes de trabajar en frío la aleación de titanio α-β, la aleación de titanio α-β se trabaja a una temperatura superior a 841 °C (1600 °F) para proporcionar a la aleación una microestructura que conduce a una deformación en frío posterior.

3. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β se realiza a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente hasta menos de 677 °C (1250 °F).

4. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β se realiza a una temperatura en el intervalo de temperatura ambiente hasta menos de 538 °C (1000 °F).

5. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende trabajar la aleación de titanio α-β a menos de 677 °C (1250 °F) mediante al menos una técnica seleccionada de entre el grupo que consiste en laminado, forjado, extrusión, laminado, balanceo, trefilado, giro de flujo, conformación de compresión líquida, conformación de compresión de gas, hidroconformación, conformación de protuberancias, conformación de rodillos, estampado, supresión fina, prensado en troquel, trefilado profundo, acuñación, hilatura, estampado, extrusión de impacto, conformación explosiva, conformación de caucho, extrusión posterior, perforación, conformación por estirado, flexión por presión, conformación electromagnética y estampación en frío.

6. El método de la reivindicación 1, en el que el artículo se selecciona de entre el grupo que consiste en una bobina, una chapa, una tira, una lámina, una placa, una barra, una varilla, un alambre, un cuerpo hueco tubular, una tubería, un tubo, un paño, una malla, un miembro estructural, un cono, un cilindro, un conducto, una boquilla, una estructura de panal de abeja, un sujetador, un remache y una arandela.

7. El método de la reivindicación 1, en el que la aleación de titanio α-β tiene una tensión de flujo más baja que la aleación de Ti-6Al-4V.

8. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende laminar en frío la aleación de titanio α-β y en el que el artículo es generalmente un artículo laminado plano seleccionado de entre el grupo que consiste en una chapa, una tira, una lámina y una placa.

9. El método de la reivindicación 8, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende reducir un espesor de la aleación de titanio α-β mediante al menos dos etapas de laminación en frío y en donde el método comprende además:

recocer el intermedio de la aleación de titanio α-β de etapas sucesivas de laminación en frío, en las que el recocido de la aleación de titanio α-β reduce las tensiones dentro de la aleación de titanio α-β.

10. El método de la reivindicación 9, en el que al menos una etapa de laminación en frío sucesiva de recocido intermedio se realiza en una línea de horno de recocido continuo.

11. El método de las reivindicaciones 8, 9 o 10, en el que, en al menos una de las etapas de laminado en frío, el espesor de la aleación de titanio α-β se reduce en un 30 % a un 60 %.

12. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende laminar la aleación de titanio α-β y en el que el artículo se selecciona de entre el grupo que consiste en una varilla, un alambre, una barra y un cuerpo hueco tubular.

13. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende al menos uno de laminar y balancear la aleación de titanio α-β y en el que el artículo es uno de un tubo y una tubería.

14. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende prefilar la aleación de titanio α-β y en el que el artículo se selecciona de entre el grupo que consiste en una varilla, un alambre, una barra y un cuerpo hueco tubular.

15. El método de la reivindicación 1, en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende al menos uno de giro de flujo, hilatura por cizallamiento e hilatura de la aleación de titanio α-β y en el que el artículo tiene simetría axial.

16. El método de la reivindicación 1, en el que el artículo tiene un espesor de hasta 10 cm (4 pulgadas) y en el que las propiedades a temperatura ambiente del artículo incluyen resistencia a la tracción de al menos 827 MPa (120 KSI) y resistencia a la tracción final de al menos 896 MPa (130 KSI) y un alargamiento de al menos el 10 %.

17. El método de la reivindicación 16, en el que el artículo tiene un alargamiento de al menos el 12 %.

18. El método de la reivindicación 1, en el que las propiedades de límite elástico, resistencia a la tracción final y alargamiento del artículo son al menos tan grandes como para Ti-6Al-4V.

19. El método de la reivindicación 1, en el que el artículo puede doblarse alrededor de un radio de 4 veces su espesor sin fallo del artículo.

20. El método de la reivindicación 11, en el que el artículo se selecciona de entre el grupo que consiste en una chapa, una tira, una lámina y una placa.

21. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el artículo es una placa de blindaje y en el que el trabajo en frío de la aleación de titanio α-β comprende:

laminar la aleación a una temperatura no superior a 222 °C (400 °F) por debajo de la T_β de la aleación.

22. El método de la reivindicación 21, en el que el laminado de la aleación comprende laminar la aleación a una temperatura que está en el intervalo de 222 °C a 389 °C (400 °F a 700 °F) por debajo de la T_β de la aleación.