

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 812 760**

51 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: **06.01.2016 PCT/US2016/012276**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.07.2016 WO16114956**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.01.2016 E 16702229 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.05.2020 EP 3245308**

54 Título: **Aleación de titanio**

30 Prioridad:

12.01.2015 US 201514594300

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

18.03.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

FOLTZ, JOHN, W.

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 812 760 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

Aleación de titanio

Antecedentes de la tecnología

5

Campo de la tecnología

La presente divulgación se refiere a aleaciones de titanio alfa-beta de alta resistencia.

10 Descripción de los antecedentes de la tecnología

Las aleaciones de titanio muestran normalmente una elevada relación entre la resistencia y el peso, son resistentes a la corrosión y son resistentes a la termofluencia a temperaturas moderadamente elevadas. Por estas razones, las aleaciones de titanio se usan en aplicaciones aeroespaciales, aeronáuticas, de defensa, de marina y automovilísticas que incluyen, por ejemplo, componentes de trenes de aterrizaje, bastidores de motor, protección antibalas, cascos y cierres mecánicos.

15

La reducción del peso de una aeronave u otro vehículo motorizado lleva a un ahorro de combustible. Así, por ejemplo, existe un enorme impulso en la industria aeroespacial para la reducción del peso de las aeronaves. El titanio y las aleaciones de titanio son materiales atractivos para conseguir una reducción del peso en aplicaciones aeronáuticas debido a sus elevadas relaciones entre la resistencia y el peso. La mayoría de las piezas de aleación de titanio usadas en aplicaciones aeroespaciales están hechas de una aleación Ti-6Al-4V (ASTM Grado 5; UNS R56400; AMS 4928, AMS 4911), que es una aleación de titanio alfa-beta.

20

La aleación Ti-6Al-4V es uno de los materiales fabricados a base de titanio más comunes y se estima que representa más un 50 % del mercado total de los materiales a base de titanio. La aleación Ti-6Al-4V se usa en una serie de aplicaciones que se benefician de la combinación ventajosa del bajo peso, la resistencia a la corrosión y la elevada resistencia de la aleación a temperaturas de moderadas a bajas. Por ejemplo, la aleación Ti-6Al-4V se usa para producir componentes de motores de aeronaves, componentes estructurales de aeronaves, cierres, componentes de automóvil de altas prestaciones, componentes para dispositivos médicos, equipamientos deportivos, componentes para aplicaciones marinas y componentes para equipos de procesamiento químico.

25

30

La ductilidad es una propiedad de cualquier material metálico dado (es decir, metales y aleaciones metálicas). La conformabilidad en frío de un material metálico se basa en cierto grado en la ductilidad a una temperatura próxima a la temperatura ambiente y en la capacidad del material para deformarse sin agrietamiento. Las aleaciones de titanio alfa-beta de alta resistencia tales como, por ejemplo, la aleación Ti-6Al-4V, tienen normalmente una baja conformabilidad en frío a temperatura ambiente o a una temperatura próxima a la misma. Esto limita su aprobación para procesamientos a baja temperatura tal como el laminado en frío ya que estas aleaciones pueden agrietarse y romperse cuando se trabajan a bajas temperaturas. Por tanto, debido a su limitada conformabilidad en frío a temperatura ambiente o a una temperatura próxima a la misma, las aleaciones de titanio alfa-beta se procesan normalmente mediante técnicas que implican un exhaustivo trabajo en caliente.

35

40

Las aleaciones de titanio que exhiben ductilidad a temperatura ambiente también exhiben por lo general una resistencia relativamente baja. Una consecuencia de esto es que las aleaciones de alta resistencia normalmente son más costosas y tienen un menor control del grosor debido a las tolerancias de la trituración. Este problema proviene de la deformación de la estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) en estas aleaciones beta de mayor resistencia a temperaturas por debajo de varios cientos de grados Celsius.

45

La estructura cristalina HCP es común a muchos materiales de ingeniería que incluyen aleaciones de magnesio, titanio, zirconio y cobalto. La estructura cristalina HCP presenta una secuencia de apilamiento ABABAB, mientras que otras aleaciones metálicas, tales como el acero inoxidable, el latón y aleaciones de níquel y aluminio tienen normalmente estructuras cristalinas cúbicas centradas en las caras (FCC) con secuencias de apilamiento ABCABCABC. Como resultado de esta diferencia de la secuencia de apilamiento, los metales y aleaciones HCP tienen un número significativamente reducido de sistemas de deslizamiento independientes matemáticamente posibles con relación a los materiales FCC. Varios sistemas de deslizamiento independientes en los metales y aleaciones HCP requieren tensiones significativamente mayores para ser activados y estos modos de deformación de "alta resistencia" son activados solo en casos extremadamente raros. Este efecto es sensible a la temperatura, de modo que a temperaturas por debajo de varios cientos de grados Celsius, las aleaciones de titanio tienen una maleabilidad significativamente menor.

50

55

60

En combinación con los sistemas de deslizamiento presentes en los materiales HCP, son posibles una serie de sistemas de maclaje en metales HCP no aleados. La combinación de los sistemas de deslizamiento y los sistemas de maclaje en el titanio permiten suficientes modos de deformación independientes de modo que el titanio "comercialmente puro" (CP) se puede trabajar en frío a temperaturas próximas a la temperatura ambiente (es decir, en un intervalo de temperaturas aproximado de • 100 °C a +200 °C).

65

Los efectos de aleación en el titanio y otros metales y aleaciones HCP tienden a incrementar la asimetría o dificultad de los modos de deslizamiento de "alta resistencia", así como a inhibir la activación de los sistemas de maclaje. Un resultado es la pérdida macroscópica de la capacidad de procesamiento en frío de aleaciones tales como la aleación Ti-6Al-4V y la aleación Ti-6Al-2-Sn-4Zr-2Mo-0,1Si. Las aleaciones Ti-6Al-4V y Ti-6Al-2-Sn-4Zr-2Mo-0,1Si exhiben una resistencia relativamente elevada debido a su alta concentración de fase alfa y a su alto nivel de elementos aleantes. En particular, el aluminio es conocido porque incrementa la resistencia de las aleaciones de titanio, tanto a temperatura elevada como a temperatura ambiente. Sin embargo, el aluminio se conoce también porque influye negativamente en la capacidad de procesamiento a temperatura ambiente.

En general, las aleaciones que exhiben una capacidad de deformación en frío se pueden fabricar más eficazmente en términos de consumo de energía y de cantidad de desechos generados durante el procesamiento. Por tanto, es ventajoso por lo general formular una aleación que se pueda procesar a temperaturas relativamente bajas.

Algunas aleaciones de titanio conocidas han proporcionado una mayor capacidad de procesamiento a temperatura ambiente mediante la inclusión de grandes concentraciones de adiciones aleantes que estabilizan la fase beta. Ejemplos de tales aleaciones incluyen la aleación de titanio Beta C (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr; UNS R58649), que está disponible en el mercado en una forma como la aleación de titanio beta ATI 38-644® de Allegheny Technologies Incorporated, Pittsburgh, Pennsylvania, EE.UU. Esta aleación y otras aleaciones formuladas de forma similar proporcionan una capacidad de procesamiento en frío ventajosa mediante la reducción o la eliminación de la fase alfa de la microestructura. Normalmente estas aleaciones pueden precipitar la fase alfa durante tratamientos de envejecimiento de baja temperatura.

A pesar de su ventajosa capacidad de procesamiento en frío, las aleaciones de titanio beta presentan en general dos desventajas: adiciones a la aleación costosas y baja resistencia a la termofluencia a temperatura elevada. La baja resistencia a la termofluencia a temperatura elevada es el resultado de la concentración significativa de la fase beta que exhiben estas aleaciones a temperaturas elevadas tales como, por ejemplo, de 500 °C. La fase beta no presenta resistencia a la termofluencia debido a su estructura cúbica centrada en el cuerpo, que proporciona un mayor número de mecanismos de deformación. El mecanizado de las aleaciones de titanio beta es conocido también por ser difícil debido al módulo elástico relativamente bajo de las aleaciones, lo que permite una recuperación elástica más significativa. Como consecuencia de estas deficiencias se ha limitado el uso de las aleaciones de titanio beta.

Serían posibles productos de titanio de menor coste si las aleaciones de titanio existentes fueran más resistentes al agrietamiento durante el procesamiento en frío. Puesto que las aleaciones de titanio alfa-beta representan la mayor parte de todo el titanio aleado producido, si se mantuviera este tipo de aleación el coste se podría reducir adicionalmente por los volúmenes de escala. Por tanto, aleaciones interesantes para examinar son las aleaciones de titanio alfa-beta de alta resistencia y deformables en frío. Recientemente se han desarrollado varias aleaciones dentro de esta clase de aleaciones. Por ejemplo, en los últimos 15 años se han desarrollado la aleación Ti-4Al-2,5V (UNS R54250), la aleación Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe, la aleación Ti-5Al-4V-0,7Mo-0,5Fe y la aleación Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr-0,4Fe. Muchas de estas aleaciones presentan adiciones aleantes costosas tales como V y/o Mo.

La aleación de titanio alfa-beta Ti-6Al-4V es la aleación de titanio convencional usada en la industria aeroespacial y representa una gran fracción del titanio aleado en términos de tonelaje. La aleación es conocida en la industria aeroespacial por que no se puede trabajar en frío a temperatura ambiente. Los grados con menor contenido de oxígeno de la aleación Ti-6Al-4V, denominados aleaciones Ti-6Al-4V ELI ("intersticiales extra bajos") (UNS 56401), exhiben por lo general una ductilidad, una tenacidad y una conformabilidad mejoradas a temperatura ambiente en comparación con los grados con mayor contenido de oxígeno. Sin embargo, la resistencia de la aleación Ti-6Al-4V disminuye significativamente a medida que se reduce el contenido de oxígeno. El experto en la técnica consideraría la adición de oxígeno perjudicial para la capacidad de conformación en frío y ventajosa para la resistencia de las aleaciones Ti-6Al-4V.

Sin embargo, a pesar del mayor contenido de oxígeno que la aleación Ti-6Al-4V de grado convencional, la aleación Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,250 (conocida también como aleación Ti-4Al-2,5V) es conocida por tener unas capacidades de conformación superiores a temperatura ambiente o a una temperatura próxima a la misma en comparación con la aleación Ti-6Al-4V. La aleación Ti-4Al-2,5V-1,5Fe-0,250 es una aleación disponible en el mercado como la aleación de titanio ATI 425® de Allegheny Technologies Incorporated. La ventajosa capacidad de conformación a una temperatura próxima a la temperatura ambiente de la aleación ATI 425® se discute en las patentes de Estados Unidos con n.ºs 8 048 240, 8 597 442 y 8 597 443 y en la publicación de la solicitud de patente de Estados Unidos con n.º 2014-0060138 A1. La publicación de patente US 3 649 259 divulga una composición de una aleación de titanio que tiene excelentes características de endurecimiento profundo así como una combinación de una elevada resistencia en secciones gruesas junto con una ductilidad y una tenacidad a la fractura buenas.

Otra aleación de titanio alfa-beta de alta resistencia y deformable en frío es la aleación Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe, conocida también como aleación SP-700. A diferencia de la aleación Ti-4Al-2,5V, la aleación SP-700 contiene ingredientes aleantes de mayor coste. Al igual que la aleación Ti-4Al-2,5V, la aleación SP-700 tiene una baja resistencia a la termofluencia con respecto a la aleación Ti-6Al-4V debido a un mayor contenido de fase beta.

La aleación Ti-3Al-5Mo-5V-3Cr exhibe también buenas capacidades de conformación a temperatura ambiente. Esta aleación, sin embargo, incluye un contenido significativo de fase beta a temperatura ambiente y, por tanto, exhibe una baja resistencia a la termofluencia. Además, contiene un nivel significativo de ingredientes aleantes de elevado coste, tales como el molibdeno y el cromo.

5 Por lo general se entiende que el cobalto no influye sustancialmente en la resistencia mecánica y la ductilidad de la mayoría de las aleaciones de titanio en comparación con adiciones aleantes alternativas. Se ha descrito que aunque la adición de cobalto aumenta la resistencia de aleaciones binarias y ternarias de titanio, la adición de cobalto también reduce normalmente la ductilidad de forma más extrema que la adición de hierro, molibdeno o vanadio (adiciones aleantes normales). Se ha demostrado que si bien las adiciones de cobalto a la aleación Ti-6Al-4V pueden mejorar la resistencia y la ductilidad, también pueden formar precipitados intermetálicos del tipo Ti₃X durante el envejecimiento e influir negativamente en otras propiedades mecánicas.

15 Sería ventajoso proporcionar una aleación de titanio que incluyera unos niveles relativamente pequeños de adiciones aleantes costosas, que exhibiera una combinación ventajosa de resistencia y ductilidad y que no desarrollara sustancialmente un contenido de fase beta.

Sumario

20 La invención proporciona una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la reivindicación 1 de las reivindicaciones adjuntas. La aleación proporciona además un método para la formación de un artículo a partir de una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la reivindicación 2 de las reivindicaciones adjuntas.

La equivalencia de aluminio, tal como se define en el presente documento, es en términos de un peso equivalente.

25 La equivalencia de molibdeno, tal como se define en el presente documento, es en términos de un porcentaje en peso equivalente de molibdeno y se calcula mediante la siguiente ecuación, en la que el contenido de cada elemento estabilizador de la fase beta es en porcentaje en peso:

$$30 \quad [Mo]_{eq} = [Mo] + 2\phi[V] + 3[Mn+Fe+Ni+Cr+Cu+Be] + 1\phi[Ta+Nb+W].$$

De acuerdo con la presente invención, una aleación de titanio alfa-beta comprende, en porcentajes en peso: de un 2,0 a un 7,0 de aluminio; una equivalencia de molibdeno en el intervalo de un 2,0 a un 5,0; de un 0,3 a un 4,0 de cobalto; hasta un 0,5 de oxígeno; opcionalmente de más de un 0 a un 6 % de Sn; opcionalmente de más de un 0 a un 0,6 % de Si, opcionalmente un aditivo de afino del grano, en la que el aditivo de afino del grano es uno de los siguientes: Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Ho, Er, Th, Y, Sc, Be y B, en una concentración total que es de más de un 0 hasta un 0,3; opcionalmente un aditivo inhibidor de la corrosión, en la que el aditivo inhibidor de la corrosión es uno de los siguientes: Au, Ag, Pd, Pt, Ni e Ir, en una concentración total que es de más de un 0 hasta un 0,5 %; hasta un 0,25 de nitrógeno; hasta un 0,3 de carbono; hasta un 0,4 de impurezas accidentales; y titanio. La equivalencia de molibdeno viene dada por la ecuación:

$$[Mo]_{eq} = [Mo] + 2\phi[V] + 3[Mn+Fe+Ni+Cr+Cu+Be] + 1\phi[Ta+Nb+W].$$

45 Otro aspecto de la presente divulgación se refiere a un método para la formación de un artículo a partir de la aleación de titanio alfa-beta de la reivindicación 1. El método incluye producir una estructura que se puede trabajar en frío, en el que el material está sujeto a reducciones en frío del 25 % o más del área de la sección transversal.

Se entiende que la invención divulgada y descrita en la presente memoria descriptiva no se limita a las realizaciones recogidas en este sumario.

50 Breve descripción de las figuras

Varias particularidades y características de las realizaciones no limitantes y no exhaustivas divulgadas y descritas en la presente memoria descriptiva se pueden comprender mejor con referencia a las figuras adjuntas, en las que:

55 La FIG. 1 es un diagrama de flujo de una realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación; y

La FIG. 2 es un diagrama de flujo de otra realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación.

60 DESCRIPCIÓN

El lector apreciará los detalles anteriores, así como otros, al considerar la siguiente descripción detallada de varias realizaciones no limitantes y no exhaustivas de acuerdo con la presente divulgación.

65

En la presente memoria descriptiva se describen y se ilustran varias realizaciones a fin de proporcionar una comprensión global de la estructura, función, operación, fabricación y uso de los procedimientos y productos divulgados. Se entiende que las diversas realizaciones descritas e ilustradas en la presente memoria descriptiva son no limitantes y no exhaustivas. Por tanto, la invención no está limitada por la descripción de las diversas realizaciones no limitantes y no exhaustivas divulgadas en la presente memoria descriptiva. En su lugar, la invención viene definida únicamente por las reivindicaciones,

Todos los porcentajes y las proporciones proporcionados para una composición de aleación están basados en el peso total de la composición de aleación total, a menos que se indique lo contrario.

En la presente memoria descriptiva, aparte de donde se indique de otro modo, se ha de entender que todos los parámetros numéricos están precedidos y modificados en todos los casos por el término "aproximadamente", en la que los parámetros numéricos poseen la característica de variabilidad inherente de las técnicas de medición subyacentes empleadas para determinar el valor numérico del parámetro. Como mínimo, y no como un intento de limitar la aplicación de la doctrina de los equivalentes al alcance de las reivindicaciones, cada parámetro numérico descrito en la presente descripción se debe interpretar al menos a la luz del número de dígitos significativos citados y mediante la aplicación de técnicas de redondeo ordinarias.

Los artículos gramaticales "uno", "una", "un", y "el", "la", tal como se usan en la presente memoria descriptiva, se pretende que incluyan "al menos uno/una/un" o "uno/una o más", a menos que se indique de otra forma. Así, los artículos se usan en la presente memoria descriptiva para referirse a uno o más de uno (es decir, a "al menos uno") de los objetos gramaticales del artículo. A modo de ejemplo, "un componente" significa uno o más componentes, y así, posiblemente, se contempla más de un componente y se puede emplear o usar en una implementación de las realizaciones descritas. Asimismo, el uso de un nombre singular incluye el plural, y el uso un nombre plural incluye el singular, a menos que el contexto del uso requiera otra cosa.

Tal como se usa en el presente documento, el término "palanquilla" ("*billet*") se refiere a un producto sólido semiacabado, que tiene por lo general una sección redonda o cuadrada y que se ha trabajado en caliente mediante forja, laminado o extrusión. Esta definición es consistente con la definición de "palanquilla" dada, por ejemplo en *ASM Materials Engineering Dictionary*, J. R. Davis, ed., ASM International (1992), pág. 40.

Tal como se usa en el presente documento, el término "barra" se refiere a un producto sólido forjado, laminado o extruido a partir de una palanquilla para dar una forma que habitualmente tiene una sección transversal simétrica, por lo general redonda, hexagonal, octagonal, cuadrada o rectangular, con bordes redondeados o afilados y que tiene una longitud mayor que sus dimensiones transversales. Esta definición es consistente con la definición de "barra" dada, por ejemplo en *ASM Materials Engineering Dictionary*, J. R. Davis, ed., ASM International (1992), pág. 32. Se reconoce que, tal como se usa en el presente documento, el término "barra" puede referirse a la forma descrita anteriormente, aunque la forma puede no tener una sección transversal simétrica tal como, por ejemplo, una sección transversal asimétrica de una barra laminada a mano.

Tal como se usa en el presente documento, la expresión "trabajo en frío" se refiere a trabajar un artículo metálico (es decir, de un metal o una aleación metálica) a una temperatura por debajo de la cual la tensión de fluencia del material disminuye significativamente. Los ejemplos de trabajo en frío implican el procesamiento de un artículo metálico a tales temperaturas usando una o más técnicas seleccionadas entre laminado, forjado, extrusión, laminado a paso de peregrino, basculación, estirado, torneado hidráulico, conformado por compresión líquida, conformado por compresión gaseosa, hidroconformado, conformado por estirado, conformado por expansión, formación de perfiles estampados, estampación, troquelado de precisión, prensado con matriz, embutición profunda, acuñación, rotación, recalcado, extrusión por impacto, conformado por explosión, conformado con caucho, extrusión inversa, punzonado, conformado por estiramiento, curvado por prensado, conformado electromagnético y acuñación en frío. Tal como se usa en el presente documento con respecto a la presente invención, las expresiones "trabajo en frío", "trabajado en frío", "conformado en frío" y similares, usadas con referencia a una técnica de trabajo o conformado particular, se refiere al trabajo o a la característica de haber sido trabajado, según sea el caso, a una temperatura no superior a aproximadamente 677 °C (1250 °F). En determinadas realizaciones, tal trabajo se produce a una temperatura no superior a aproximadamente 538 °C (1000 °F). En determinadas realizaciones diferentes, el trabajo en frío se produce a una temperatura no superior a aproximadamente 300 °C (575 °F). Los términos "trabajo" y "conformado" se usan generalmente de forma indistinta en el presente documento, al igual que los términos "operabilidad" y "conformabilidad" y términos similares.

Tal como se usa en el presente documento, la expresión "límite de ductilidad" se refiere al límite o cantidad máxima de reducción o deformación plástica que un material metálico puede soportar sin fracturarse o agrietarse. Esta definición es consistente con la definición de "límite de ductilidad" dada, por ejemplo en *ASM Materials Engineering Dictionary*, J. R. Davis, ed., ASM International (1992), pág. 131. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "reducción del límite de ductilidad" se refiere a la cantidad o grado de reducción que un material metálico puede soportar antes de agrietarse o fracturarse.

La referencia en el presente documento a una aleación de titanio alfa-beta "que comprende" una composición

particular se pretende que englobe aleaciones "que consisten esencialmente en" o "que consisten en" la composición indicada. Se entenderá que las composiciones de aleación de titanio alfa-beta descritas en el presente documento que "comprenden", "consisten en" o "consisten esencialmente en" una composición particular, pueden incluir también impurezas accidentales.

5 Un aspecto no limitante de la presente divulgación se refiere a una aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que exhibe ciertas propiedades de deformación en frío superiores a la aleación Ti-6Al-4V, aunque sin la necesidad de proporcionar una fase beta adicional o de restringir más el contenido de oxígeno en comparación con la aleación Ti-6Al-4V. El límite de ductilidad de las aleaciones de la presente divulgación aumenta significativamente en
10 comparación con el de la aleación Ti-6Al-4V.

Contrariamente al conocimiento actual de que las adiciones de oxígeno a aleaciones de titanio reducen la conformabilidad de las aleaciones, las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento poseen una conformabilidad mayor que la aleación Ti-6Al-4V mientras que incluyen hasta un
15 66 % más de contenido de oxígeno que la aleación Ti-6Al-4V. El intervalo de composición de las realizaciones de la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto divulgada en el presente documento permite una mayor flexibilidad del uso de la aleación, sin añadir ningún coste sustancial asociado a las adiciones aleantes. Si bien varias realizaciones de las aleaciones de acuerdo con la presente divulgación pueden ser más costosas que la aleación Ti-4Al-2,5V en términos del coste de los materiales de partida, los costes de los aditivos aleantes para las aleaciones
20 de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento pueden ser menores que los de ciertas otras aleaciones de titanio alfa-beta conformables en frío.

Se ha descubierto que la adición de cobalto a las aleaciones de titanio alfa-beta divulgadas en el presente documento aumenta la ductilidad de las aleaciones cuando las aleaciones incluyen también bajos niveles de aluminio. Además, se ha descubierto que la adición de cobalto a las aleaciones de titanio alfa-beta de acuerdo con la
25 presente divulgación aumenta la resistencia de la aleación.

Aunque se sabe que el cobalto es un estabilizador de la fase beta del titanio, para todas las realizaciones divulgadas en el presente documento, la equivalencia de molibdeno es en términos de un porcentaje en peso equivalente de molibdeno y se calcula en el presente documento mediante la ecuación siguiente, en la que el contenido de cada elemento estabilizador de la fase beta es en porcentaje en peso:

$$[\text{Mo}]_{\text{eq}} = [\text{Mo}] + 2\text{[V]} + 3[\text{Mn}+\text{Fe}+\text{Ni}+\text{Cr}+\text{Cu}+\text{Be}] + 1\text{[Ta}+\text{Nb}+\text{W}].$$

35 En determinadas realizaciones no limitantes de acuerdo con la presente divulgación, las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento incluyen de más de un 0 hasta un 0,3 por ciento en peso total de uno o más aditivos de afino del grano. El uno o más aditivos de afino del grano puede ser cualquiera de los aditivos de afino del grano conocidos por los expertos habituales en la técnica que incluyen, si bien no se limitan a los mismos, cerio, praseodimio, neodimio, samario, gadolinio, holmio, erbio, tulio, itrio, escandio, berilio y boro.
40

En otras realizaciones no limitantes, cualquiera de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento puede incluir adicionalmente de más de un 0 hasta un 0,5 por ciento en peso total de uno o más aditivos inhibidores de la corrosión metálica. Los aditivos inhibidores de la corrosión pueden ser
45 uno cualquiera o más de los aditivos inhibidores de la corrosión conocidos por su uso en aleaciones de titanio alfa-beta. Tales aditivos incluyen, si bien no se limitan a los mismos, oro, plata, paladio, platino, níquel e iridio.

En realizaciones no limitantes adicionales, cualquier de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento puede incluir uno o más de, en porcentajes en peso: de más de un 0 a un 6,0 de estaño; de más de un 0 a un 0,6 de silicio. Se cree que las adiciones de estos elementos dentro de estos intervalos de concentraciones no influirán en la proporción de las concentraciones de las fases alfa y beta de la
50 aleación.

En determinadas realizaciones no limitantes de una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la presente divulgación, la aleación de titanio alfa-beta exhibe un límite elástico de al menos 896,3 MPa (130 KSI) y un porcentaje de alargamiento de al menos un 10 %. En otras realizaciones no limitantes, la aleación de titanio alfa-beta exhibe un límite elástico de al menos 1034 MPa (150 KSI) y un porcentaje de alargamiento de al menos un 16 %.
55

En determinadas realizaciones no limitantes de una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la presente divulgación, la aleación de titanio alfa-beta exhibe una reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío de al menos un 20 %. En otras realizaciones no limitantes, la aleación de titanio alfa-beta exhibe una reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío de al menos un 25 % o de al menos un 35 %.
60

En determinadas realizaciones no limitantes, las aleaciones de titanio alfa-beta del presente documento que comprenden aluminio pueden comprender adicionalmente uno o más de, en porcentajes en peso: de más de un 0 a
65

ES 2 812 760 T3

un 6 de estaño; de más de un 0 a un 0,6 de silicio; de más de un 0 a un 0,3 de paladio; y de más de un 0 a un 0,5 de boro.

5 En determinadas realizaciones no limitantes de una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la presente divulgación que comprende aluminio, las aleaciones pueden incluir adicionalmente de más de un 0 hasta un 0,3 por ciento en peso total de uno o más aditivos de afino del grano. El uno o más aditivos de afino del grano pueden ser, por ejemplo, cualquiera de los siguientes aditivos de afino del grano: cerio, praseodimio, neodimio, samario, gadolinio, holmio, erbio, tulio, itrio, escandio, berilio y boro.

10 En determinadas realizaciones no limitantes de una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la presente divulgación que comprende aluminio, las aleaciones pueden incluir adicionalmente de más de un 0 hasta un 0,5 por ciento en peso total de uno o más aditivos de resistencia a la corrosión conocidos por los expertos habituales en la técnica que incluyen, si bien no se limitan a los mismos, oro, plata, paladio, platino, níquel e iridio.

15 Determinadas realizaciones no limitantes de las aleaciones de titanio alfa-beta divulgadas en el presente documento que comprenden cobalto y aluminio exhiben un límite elástico de al menos 896 MPa (130 KSI) y un porcentaje de alargamiento de al menos un 10 %. Otras realizaciones no limitantes de las aleaciones de titanio alfa-beta del presente documento que comprenden cobalto y aluminio exhiben un límite elástico de al menos 1034 MPa (150 KSI) y un porcentaje de alargamiento de al menos un 16 %.

20 Determinadas realizaciones no limitantes de las aleaciones de titanio alfa-beta divulgadas en el presente documento que comprenden cobalto y aluminio exhiben una reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío de al menos un 25 %. Otras realizaciones no limitantes de las aleaciones de titanio alfa-beta del presente documento que comprenden cobalto y aluminio exhiben una reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío de al menos un 35 %.

30 Con referencia a la figura 1, otro aspecto de la presente divulgación se refiere a un método 100 de formación de un artículo a partir de una forma metálica que comprende una aleación de titanio alfa-beta de acuerdo con la presente divulgación. El método 100 comprende el trabajo en frío 102 de una forma metálica hasta al menos un 25 por ciento de reducción del área de la sección transversal. La forma metálica comprende cualquiera de las aleaciones de titanio alfa-beta divulgadas en el presente documento. Durante el trabajo en frío 102, de acuerdo con un aspecto de la presente divulgación, la forma metálica no exhibe un agrietamiento importante. La expresión "agrietamiento importante" se define en el presente documento como la formación de grietas que superan aproximadamente los 1,27 cm (0,5 in). En otra realización no limitante de un método de formación de un artículo de acuerdo con la

35 presente divulgación, una forma metálica que comprende una aleación de titanio alfa-beta, tal como se divulga en el presente documento, se somete a un trabajo en frío 102 hasta al menos un 35 por ciento de reducción del área de la sección transversal. Durante el trabajo en frío 102, la forma metálica no exhibe un agrietamiento importante.

40 En una realización específica, el trabajo en frío 102 de la forma metálica comprende el laminado en caliente de la forma metálica.

45 En una realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se somete a un trabajo en frío 102 a una temperatura inferior a 676,7 °C (1250 °F). En otra realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se somete a un trabajo en frío 102 a una temperatura inferior a 200 °C (392 °F). En otra realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se somete a un trabajo en frío 102 a una temperatura no superior a 300 °C (575 °F). En otra realización no limitante adicional de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se somete a un trabajo en frío 102 a una temperatura en el intervalo de • 100 °C a +200 °C.

50 En una realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se somete a un trabajo en frío 102 entre recocidos intermedios (no mostrados) hasta una reducción de al menos un 25 % o de al menos un 35 %. La forma metálica se puede recocer entre múltiples etapas intermedias de trabajo en frío a una temperatura inferior a la temperatura beta transus de la aleación a fin de aliviar las tensiones internas y minimizar las posibilidades de agrietamiento de los bordes. En realizaciones no limitantes, una etapa de recocido (no mostrada)

55 entre etapas intermedias de trabajo en frío 102 puede incluir el recocido de la forma metálica a una temperatura en el intervalo de T. • 20 °C y T. • 300 °C durante un periodo de 5 minutos a 2 horas. La T. de aleaciones de la presente divulgación está normalmente entre 900 °C y 1100 °C. La T. de cualquier aleación específica de la presente divulgación se puede determinar mediante el uso de técnicas convencionales por parte del experto habitual en la técnica sin una experimentación excesiva.

60 Tras la etapa de trabajo en frío 102 de la forma metálica, en determinadas realizaciones no limitantes del presente método, la forma metálica se puede recocer en fábrica (*mill-annealed*) (no mostrado) para obtener la resistencia y la ductilidad deseadas y la microestructura alfa-beta de la aleación. El recocido en fábrica, en una realización no limitante, puede incluir calentar la forma metálica hasta una temperatura en el intervalo de 600 °C a 930 °C y mantenerla durante un periodo de 5 minutos a 2 horas.

65

La forma metálica procesada de acuerdo con varias realizaciones de los métodos divulgados en el presente documento se puede seleccionar entre cualquier producto recocido en fábrica o cualquier producto recocido en fábrica semiacabado. El producto recocido en fábrica o el producto recocido en fábrica semiacabado se pueden seleccionar, por ejemplo, entre un lingote, una palanquilla, un palancón, una barra, una vigueta, una plancha, una varilla, un alambre, una placa, una lámina, una extrusión y una fundición.

Una realización no limitante de los métodos divulgados en el presente documento comprende adicionalmente un trabajo en caliente (no mostrado) de la forma metálica antes del trabajo en frío 102 de la forma metálica. El experto en la técnica entiende que el trabajo en caliente implica la deformación plástica de una forma metálica a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización de la aleación que comprende la forma metálica. En determinadas realizaciones no limitantes, la forma metálica se puede someter a un trabajo en caliente a una temperatura en el área de la fase beta de la aleación de titanio alfa-beta. En una realización específica no limitante, la forma metálica se calienta hasta una temperatura de al menos $T. + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se somete a un trabajo en caliente. En determinadas realizaciones no limitantes, la forma metálica se puede someter a un trabajo en caliente a una temperatura en el área de la fase beta de la aleación de titanio hasta una reducción de al menos un 20 por ciento. En determinadas realizaciones no limitantes, después del trabajo en caliente de la forma metálica en el área de la fase beta, la forma metálica se puede enfriar hasta temperatura ambiente a una velocidad que es al menos comparable con el enfriamiento con aire.

Después del trabajo en caliente a una temperatura en el área de la fase beta, en varias realizaciones no limitantes de un método de acuerdo con la presente divulgación, la forma metálica se puede someter adicionalmente a un trabajo en caliente en el área de la fase alfa-beta. El trabajo en caliente en el área de la fase alfa-beta puede incluir calentar de nuevo la forma metálica hasta una temperatura en el área de la fase alfa-beta. De forma alternativa, después de trabajar la forma metálica en el área de la fase beta, se puede enfriar la forma metálica hasta una temperatura en el área de la fase alfa-beta y someterla después a un trabajo en caliente adicional. En una realización no limitante, la temperatura del trabajo en caliente en el área de la fase alfa-beta está en un intervalo de $T. + 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T. + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. En una realización no limitante, la forma metálica se somete a un trabajo en caliente en el área de la fase alfa-beta hasta una reducción de al menos un 30 %. En una realización no limitante, después del trabajo en caliente de la forma metálica en el área de la fase alfa-beta, la forma metálica se puede enfriar hasta temperatura ambiente a una velocidad que es al menos comparable con el enfriamiento con aire. Después de enfriar, en una realización no limitante, la forma metálica se puede recocer a una temperatura en el intervalo de $T. + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T. + 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 5 minutos a 2 horas.

Con respecto a la figura 2, otro aspecto no limitante de la presente divulgación se refiere a un método 200 de formación de un artículo a partir de una aleación de titanio alfa-beta, en el que el método comprende proporcionar 202 una aleación de titanio alfa-beta que comprende, en porcentajes en peso: de un 2,0 a un 7,0 de aluminio; una equivalencia de molibdeno en el intervalo de un 2,0 a un 5,0; de un 0,3 a un 4,0 de cobalto; hasta un 0,5 de oxígeno; hasta un 0,25 de nitrógeno; hasta un 0,3 de carbono; hasta un 0,2 de impurezas accidentales; y titanio. Como tal, la aleación se denomina aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio. La aleación se somete a un trabajo en frío 204 hasta al menos un 25 por ciento de reducción del área de la sección transversal. La aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio no exhibe un agrietamiento importante durante el trabajo en frío 204.

La equivalencia de molibdeno de la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio viene dada por la siguiente ecuación, en la que los estabilizadores de la fase beta enumerados en la ecuación están en porcentaje en peso:

$$[\text{Mo}]_{\text{eq}} = [\text{Mo}] + 2\text{[V]} + 3[\text{Mn+Fe+Ni+Cr+Cu+Be}] + 1\text{[Ta+Nb+W]}.$$

En otra realización no limitante del método de la presente divulgación, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio se somete a un trabajo en frío hasta una reducción del área de la sección transversal de al menos un 35 por ciento.

En una realización no limitante, el trabajo en frío 204 de la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio hasta una reducción de al menos un 25 %, o de al menos un 35 %, tiene lugar en una o más etapas de laminado en frío. La aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio se puede recocer (no mostrado) entre múltiples etapas intermedias de trabajo en frío 204 a una temperatura inferior a la temperatura beta transus a fin de aliviar las tensiones internas y minimizar las posibilidades de agrietamiento de los bordes. En realizaciones no limitantes, una etapa de recocido entre etapas intermedias de trabajo en frío puede incluir el recocido de la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio a una temperatura en el intervalo de $T. + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T. + 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 5 minutos a 2 horas. La $T.$ de las aleaciones de la presente divulgación está normalmente entre $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. La $T.$ de cualquier aleación específica de la presente divulgación puede ser determinada por un experto habitual en la técnica sin una experimentación excesiva.

Después del trabajo en frío 204, en una realización no limitante, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto

y que contiene aluminio se puede recocer en fábrica (no mostrado) para obtener la resistencia y la ductilidad deseadas. El recocido en fábrica, en una realización no limitante, puede incluir calentar la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio hasta una temperatura en el intervalo de 600 °C a 930 °C y mantenerla durante un periodo de 5 minutos a 2 horas.

5 En una realización específica, el trabajo en frío 204 de la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento comprende un laminado en frío.

10 La aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento se somete a un trabajo en frío 204 a una temperatura inferior a 676,7 °C (1250 °F). En otra realización no limitante de un método de acuerdo con la presente divulgación, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento se somete a un trabajo en frío 204 a una temperatura no superior a 300 °C (575 °F). En otra realización no limitante, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento se somete a un trabajo en frío 204 a una temperatura inferior a 200 °C (392 °F). En otra realización no limitante adicional, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento se somete a un trabajo en frío 204 a una temperatura en el intervalo de • 100 °C a 200 °C.

20 Antes de la etapa de trabajo en frío 204, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento puede ser un producto recocido en fábrica o un producto recocido en fábrica semiacabado en una forma seleccionada entre un lingote, una palanquilla, un palancón, una vigueta, una plancha, una varilla, una barra, un tubo, un alambre, una placa, una lámina, una extrusión y una fundición.

25 Asimismo, antes de la etapa de trabajo en frío, la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento se puede someter a un trabajo en caliente (no mostrado). Los procedimientos de trabajo en caliente que se divulgan para la forma metálica anteriormente se pueden aplicar igualmente a la aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto y que contiene aluminio divulgada en el presente documento.

30 La conformabilidad en frío de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento, que incluyen mayores niveles de oxígeno que los encontrados, por ejemplo, en la aleación Ti-6Al-4V, no es lógica. Por ejemplo, el titanio de grado 4 CP (comercialmente puro), que incluye un nivel relativamente elevado de hasta un 0,4 por ciento en peso de oxígeno, es conocido por ser menos conformable que otros grados CP. Aunque la aleación de grado 4 CP tiene mayor resistencia que la de los grados 1, 2 o 3 CP, esta exhibe una menor resistencia que las realizaciones de las aleaciones divulgadas en el presente documento.

40 Las técnicas de trabajo en frío que se pueden usar con las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento incluyen, por ejemplo, si bien no se limitan a las mismas, laminado en frío, estirado en frío, extrusión en frío, forjado en frío, basculación/laminado a paso de peregrino, recalcado en frío, rotación y torneado hidráulico. Tal como se conoce en la técnica, el laminado en frío consiste generalmente en pasar artículos previamente laminados en caliente, tales como barras, láminas, placas o tiras, a través de una serie de rodillos, a menudo varias veces, hasta que se obtiene el grosor deseado. Dependiendo de la estructura de partida después del laminado en caliente (alfa-beta) y del recocido, se cree que se podría conseguir una reducción de al menos un 35-40 % del área (RA) mediante laminado en frío de una aleación de titanio alfa-beta que contiene cobalto antes de requerir un recocido previo a un laminado en frío adicional. Se cree que son posibles reducciones en frío posteriores de al menos un 20-60 %, o de al menos un 25 %, o de al menos un 35 %, dependiendo de la anchura del producto y de la configuración de laminado.

50 Basándose en las observaciones del inventor, también se puede conseguir el laminado en frío de una barra, una varilla o un alambre en varios laminadores de tipo trenes de laminado de barras, que incluyen laminadores de tipo Koch, para las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento. Ejemplos no limitantes adicionales de técnicas de trabajo en frío que se pueden usar para formar artículos a partir de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento incluyen el laminado a paso de peregrino (basculación) de cavidades tubulares extruidas para la fabricación de tuberías, tubos y conductos sin soldaduras. Basándose en las propiedades observadas de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento, se cree que se puede conseguir una reducción mayor del área (RA) en conformados de tipo compresivo que con un laminado plano. También se puede conseguir el estirado de una varilla, un alambre, una barra y cavidades tubulares. Una aplicación particularmente atractiva de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento es el estirado o el laminado a paso de peregrino para obtener cavidades tubulares para la producción de tubos sin soldadura, lo que es particularmente difícil de conseguir con la aleación Ti-6Al-4V. La conformación por estirado (denominada también en la técnica conformado rotativo con estirado (*shear spinning*)) se puede conseguir usando las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento para producir formas huecas axialmente simétricas que incluyen conos, cilindros, conductos de aeronaves, boquillas y otros componentes del tipo "directores del flujo". Se puede usar varias operaciones de conformado de tipo expansivo o compresivo con gas o líquido como el hidroconformado o el conformado por expansión. La formación de perfiles estampados de material de tipo continuo

se puede conseguir para formar variaciones estructurales de "esquina en ángulo" o componentes estructurales genéricos "Unistrut". Además, basándose en los descubrimientos del inventor, operaciones asociadas normalmente al procesado de láminas metálicas, tales como la estampación, el troquelado de precisión, el prensado con matriz, la embutición profunda y la acuñación, se pueden aplicar a las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento.

Además de las anteriores técnicas de conformado en frío, se cree que se pueden usar otras "técnicas en frío" para formar artículos a partir de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento que incluyen, si bien no se limitan a las mismas, forja, extrusión, torneado hidráulico, hidroconformado, conformado por expansión, formación de perfiles estampados, recalcado, extrusión por impacto, conformado por explosión, conformado con caucho, extrusión inversa, punzonado, rotación, conformado por estiramiento, curvado por prensado, conformado electromagnético y acuñación en frío. Los expertos habituales en la técnica, tras considerar las observaciones y conclusiones del inventor y otros detalles proporcionados en la presente descripción de la invención pueden incluir fácilmente técnicas de conformado/trabajo en frío adicionales que se pueden aplicar a las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento. Asimismo, los expertos habituales en la técnica pueden aplicar fácilmente tales técnicas a las aleaciones sin una experimentación excesiva. Por consiguiente, solo se describen determinados ejemplos de trabajo en frío de las aleaciones en el presente documento. La aplicación de tales técnicas de conformado y trabajo en frío puede proporcionar varios artículos. Tales artículos incluyen, si bien no se limitan necesariamente a los mismos: una hoja, una tira, una lámina, una placa, una barra, una varilla, un alambre, una cavidad tubular, una tubería, un tubo, una tela, una malla, un componente estructural, un cono, un cilindro, un conducto, una tubería, una boquilla, una estructura de panel, un cierre, un remache y una arandela.

La inesperada operabilidad en frío de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento da como resultado acabados superficiales más finos y una menor necesidad de un acondicionado de la superficie para eliminar la capa de óxido disperso y la escoria pesada de la superficie que normalmente se producen en la superficie de una lámina de colaminado de aleación Ti-6Al-4V. Dado el nivel de operabilidad en frío que ha observado el presente inventor, se cree que se puede producir un producto con el espesor de una lámina en longitudes de bobina a partir de las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto divulgadas en el presente documento con propiedades similares a las de la aleación Ti-6Al-4V.

Los ejemplos que siguen pretenden describir adicionalmente determinadas realizaciones no limitantes, sin restringir el alcance de la presente invención. Los expertos habituales en la técnica apreciarán que son posibles variaciones de los siguientes ejemplos dentro del alcance de la invención, la cual viene definida únicamente por las reivindicaciones.

Ejemplo 1

Se prepararon dos aleaciones que tenían composiciones fuera del alcance de la invención de modo que se esperaba una operabilidad en frío limitada. Las composiciones de estas aleaciones, en porcentajes en peso, y la capacidad para ser laminadas observada se presentan en la tabla 1.

Tabla 1

Ti	Al	Zr	O	N	C	Fe	Co	V	¿Se puede laminar en caliente?	¿Se puede laminar en frío?
86,97	4,1	3,1	0,13	0,08	0,02	1,6	0,0	4,0	No	No
87,05	4,1	3,1	0,14	0,09	0,02	0,0	1,6	3,9	Sí	Sí

Las aleaciones se fundieron y se colaron en botones mediante fusión por arco no consumible. El laminado en caliente posterior se realizó en el área de la fase beta y después en el área de la fase alfa a fin de producir una microestructura que se podía laminar en frío. Durante esta operación de laminado en caliente la aleación que no contenía cobalto falló catastróficamente, dando como resultado una falta de ductilidad. En comparación, la aleación que contenía cobalto se laminó en caliente satisfactoriamente desde un espesor de aproximadamente 1,27 cm (0,5 in) hasta un espesor de aproximadamente 0,381 cm (0,15 in). La aleación que contenía cobalto después se laminó en frío.

La aleación que contenía cobalto se laminó en frío después hasta un espesor final inferior a 0,76 mm (0,030 in) con recocido intermedio y acondicionado. El laminado en frío se efectuó hasta que se observó la aparición de grietas que mostraban una longitud de 0,635 cm (0,25 in). Se registró el porcentaje de reducción conseguido durante el trabajo en frío hasta que se observaron grietas en los bordes, es decir, la reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío. En este ejemplo se observó de forma sorprendente que una aleación de titanio alfa-beta que contenía cobalto era laminada en caliente y luego en frío de forma satisfactoria, sin exhibir grietas importantes, hasta una reducción del 25 por ciento por laminado en frío, mientras que la aleación comparativa, sin la adición de cobalto, no se podía laminar en caliente sin fallar de forma catastrófica.

Ejemplo 2

Se comparó el comportamiento mecánico de una segunda aleación (*Heat 5*) dentro del alcance de la presente divulgación con una pequeña probeta de la aleación Ti-4Al-2,5V. La tabla 2 enumera la composición de *Heat 5* y, con fines comparativos, la composición de la aleación Ti-4Al-2,5V (que no tiene Co). Las composiciones de la tabla 2 se dan en porcentajes en peso.

Tabla 2

Aleación	Al	V	O	Fe	Co	C	YS (x 6,89 MPa)	UTS (x 6,89 MPa)	% El.
Ti-4Al-2,5V	4,1	2,6	0,24	1,53	0,0	0,0	140	154	4
<i>Heat 5</i>	3,6	32,7	0,26	0,85	0,95	0,05	150	162	16

Los botones de *Heat 5* y de la aleación comparativa Ti-4Al-2,5V se prepararon mediante fusión, laminado en caliente y después laminado en frío de la misma manera que la aleación que contenía cobalto del ejemplo 1. El límite elástico (YS, *yield strength*), la resistencia a la rotura por tracción (UTS, *ultimate tensile strength*) y el porcentaje de alargamiento (% El., *% elongation*) se midieron de acuerdo con la norma ASTM E8/E8M-13a y se enumeran en la tabla 2. Ninguna aleación mostró agrietamiento durante el laminado en frío. La resistencia y la ductilidad (% El.) de la aleación *Heat 5* eran superiores a las del botón de Ti-4Al-2,5V.

Ejemplo 3

Se comparó la capacidad de laminado en frío, o la reducción del límite de ductilidad, en función de la composición de la aleación. Se compararon los botones de las aleaciones *Heat 1-4* con un botón que tenía la misma composición que la aleación Ti-4Al-2,5V usada en el ejemplo 2. Los botones se prepararon mediante fusión, laminado en caliente y después laminado en frío de la manera usada para la aleación que contenía cobalto del ejemplo 1. Los botones se laminaron en frío hasta que se observó un agrietamiento importante, es decir, hasta que se alcanzó la reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío. La tabla 3 enumera las composiciones (el resto es titanio e impurezas accidentales) de los botones de la invención y comparativos, en porcentajes en peso, y la reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío expresada en porcentaje de reducción de los botones laminados en caliente.

Tabla 3

Botón de <i>Heat</i> n.º	Al	Zr	O	V	Nb	Cr	Fe	Co	Si	Reducción del límite de ductilidad por trabajo en frío (%)
<i>Heat 1</i>	3,6	5,1	0,30	3,3	0	0	0	1	0	53
<i>Heat 2</i>	3,5	5,1	0,30	2,1	2,6	0	0	1	0	51
<i>Heat 3</i>	3,8	0	0,30	3,8	0	0	0	1	0,1	62
<i>Heat 4</i>	3,8	0	0,30	0	0	2	0	1,6	0	55
Ti-4Al-2,5V	4,1	0	0,24	2,6	0	0	1,53	0	0	40

De los resultados de la tabla 3, se observa que se tolera un contenido mayor de oxígeno sin pérdida de ductilidad en frío en las aleaciones que contienen cobalto. Las aleaciones de titanio alfa-beta de la invención (*Heat 3-4*) exhibían unas reducciones del límite de ductilidad por trabajo en frío que eran superiores a las del botón de la aleación Ti-4Al-2,5V. En comparación, cabe destacar que la aleación Ti-6Al-4V no se puede laminar en caliente para fines comerciales sin la aparición de agrietamiento y normalmente contiene de un 0,14 a un 0,18 por ciento en peso de oxígeno. Estos resultados muestran claramente que las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto de la presente divulgación mostraban de forma sorprendente una resistencia y una ductilidad en frío que son al menos comparables a las de la aleación Ti-4Al-2,5, resistencias que son comparables a las de la aleación Ti-6Al-4V, y una ductilidad en frío que es claramente superior a la de la aleación Ti-6Al-4V.

En la tabla 2, las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto de la presente divulgación muestran una ductilidad y una resistencia mayores que las de la aleación Ti-4Al-2,5V. Los resultados recogidos en las tablas 1-3 muestran que las aleaciones de titanio alfa-beta que contienen cobalto de la presente divulgación muestran una ductilidad en frío significativamente mayor que la de la aleación Ti-6Al-4V, a pesar de tener un 33-66 % más de contenido intersticial, lo que tiende a reducir la ductilidad.

No se esperaba que las adiciones de cobalto aumentaran la capacidad de laminado en frío de una aleación que contenía elevados niveles de elementos aleantes intersticiales, tales como el oxígeno. Desde la perspectiva de un experto habitual de la técnica, no se esperaba que las adiciones de cobalto aumentaran la ductilidad en frío sin reducir los niveles de resistencia. Los precipitados intermetálicos del tipo Ti_3X , donde X representa un metal, normalmente reducen la ductilidad en frío de forma bastante sustancial y se ha mostrado en el estado de la técnica

que el cobalto no aumenta sustancialmente la resistencia o la ductilidad. La mayor parte de las aleaciones de titanio alfa-beta contienen aproximadamente un 6 % de aluminio que puede formar Ti_3Al cuando se combina con adiciones de cobalto. Esto tiene un efecto perjudicial en la ductilidad.

- 5 Los resultados anteriormente presentados demuestran de forma sorprendente que las adiciones de cobalto mejoran de hecho la ductilidad y la resistencia en las presentes aleaciones de titanio en comparación con la aleación Ti-4Al-2,5V y otras aleaciones alfa + beta deformables en frío. Realizaciones de las presentes aleaciones incluyen una combinación de estabilizadores de alfa, estabilizadores de beta y cobalto.
- 10 Las adiciones de cobalto parece que funcionan con otras adiciones aleantes para permitir que las aleaciones de la presente divulgación tengan una elevada tolerancia al oxígeno sin influir negativamente en la ductilidad o la capacidad de procesamiento en frío. Convencionalmente, la elevada tolerancia al oxígeno no es proporcional a la ductilidad en frío y a una elevada resistencia simultáneamente.
- 15 Manteniendo un elevado nivel de fase alfa en la aleación es posible conservar la maquinabilidad de las aleaciones que contienen cobalto en comparación con otras aleaciones que tienen un mayor contenido de fase beta tales como, por ejemplo, la aleación Ti-5553, la aleación Ti-3553 y la aleación SP-700. La ductilidad en frío aumenta también el grado de control dimensional y de control del acabado superficial que se puede conseguir en comparación con otras aleaciones de titanio alfa-beta de alta resistencia que no son deformables en frío en productos de recocido en
- 20 fábrica.

Se entenderá que la presente descripción ilustra aquellos aspectos de la invención que son relevantes para una clara comprensión de la invención. No se han presentado determinados aspectos que serían evidentes para los expertos habituales en la técnica y que, por tanto, facilitarían una mejor comprensión de la invención, a fin de

25 simplificar la presente descripción. Si bien solo un número limitado de realizaciones de la presente invención se describe necesariamente en el presente documento, el experto habitual en la técnica, tras tener en cuenta la descripción anterior, reconocerá que se pueden emplear muchas modificaciones y variaciones de la invención. Se pretende que todas estas variaciones y modificaciones de la invención estén incluidas en la descripción anterior y en las reivindicaciones siguientes.

30

REIVINDICACIONES

1. Una aleación de titanio alfa-beta que comprende, en porcentajes en peso:

- 5 hasta un 0,5 de oxígeno;
de un 2,0 a un 7,0 de aluminio;
una equivalencia de molibdeno en el intervalo de un 2,0 a un 5,0; siendo el equivalente de molibdeno $[Mo]_{eq} = [Mo] + 2/3[V] + 3[Mn + Fe + Ni + Cr + Cu + Be] + 1/3[Ta + Nb + W]$;
de un 0,3 a un 4,0 de cobalto;
- 10 opcionalmente un aditivo de afino del grano, en donde el aditivo de afino del grano es uno o más de cerio, praseodimio, neodimio, samario, gadolinio, holmio, erbio, tulio, itrio, escandio, berilio y boro, en una concentración total que es de más de un 0 hasta un 0,3;
opcionalmente un aditivo inhibidor de la corrosión, en donde el aditivo inhibidor de la corrosión es uno o más de oro, plata, paladio, platino, níquel e iridio, en una concentración total que es de más de un 0 hasta un 0,5;
- 15 opcionalmente de más de un 0 a un 6 de estaño;
opcionalmente de más de un 0 a un 0,6 de silicio;
opcionalmente hasta un 0,25 de nitrógeno;
opcionalmente hasta un 0,3 de carbono; y
el resto titanio; y
- 20 hasta un 0,4 de impurezas accidentales.

2. Un método de formación de un artículo a partir de una forma metálica que comprende una aleación de titanio alfa-beta, comprendiendo el método:

- 25 someter una forma metálica a un trabajo en frío a una temperatura inferior a 676,7 °C (1250 °F) hasta al menos un 25 por ciento de reducción del área de la sección transversal;
en donde la forma metálica comprende la aleación de titanio alfa-beta de la reivindicación 1; y
en donde la forma metálica no exhibe un agrietamiento importante después del trabajo en frío.
- 30 3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende someter la forma metálica a un trabajo en frío hasta al menos un 35 por ciento de reducción.
4. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende uno o más de laminado, forjado, extrusión, laminado a paso de peregrino, basculación, estirado, torneado hidráulico, conformado por compresión líquida, conformado por compresión gaseosa, hidroconformado, conformado por expansión, formación de perfiles estampados, estampación, troquelado de precisión, prensado con matriz, embutición profunda, acuñación, rotación, recalado, extrusión por impacto, conformado por explosión, conformado con caucho, extrusión inversa, punzonado, conformado por estiramiento, curvado por prensado, conformado electromagnético y acuñación en frío.
- 40 5. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende un laminado en frío.
6. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende el trabajo de la forma metálica a una temperatura no superior a 300 °C (575 °F).
7. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende el trabajo de la forma metálica a una temperatura inferior a 200 °C (392 °F).
- 50 8. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el trabajo en frío de la forma metálica comprende el trabajo de la forma metálica a una temperatura en el intervalo de -100 °C a 200 °C.
9. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la forma metálica se selecciona entre un lingote, una palanquilla, un palancón, una vigueta, una barra, un tubo, una plancha, una varilla, un alambre, una placa, una lámina, una extrusión y una fundición.
- 55 10. El método de acuerdo con la reivindicación 2, que comprende adicionalmente el trabajo en caliente de la forma metálica antes del trabajo en frío de la forma metálica.

60

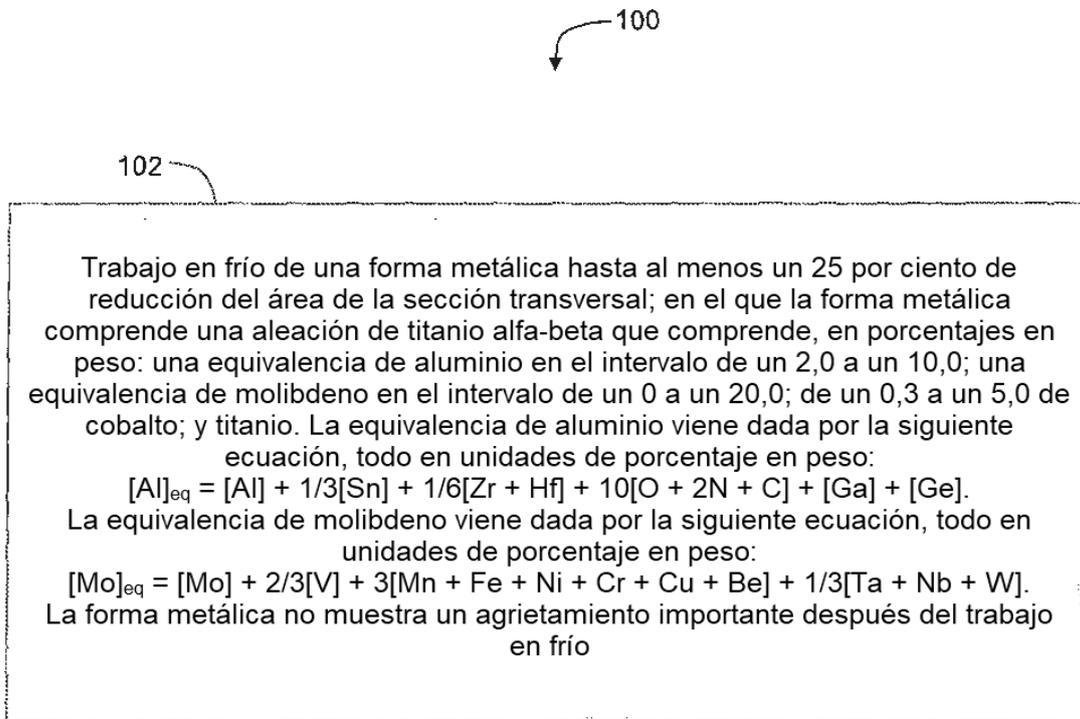


FIG. 1

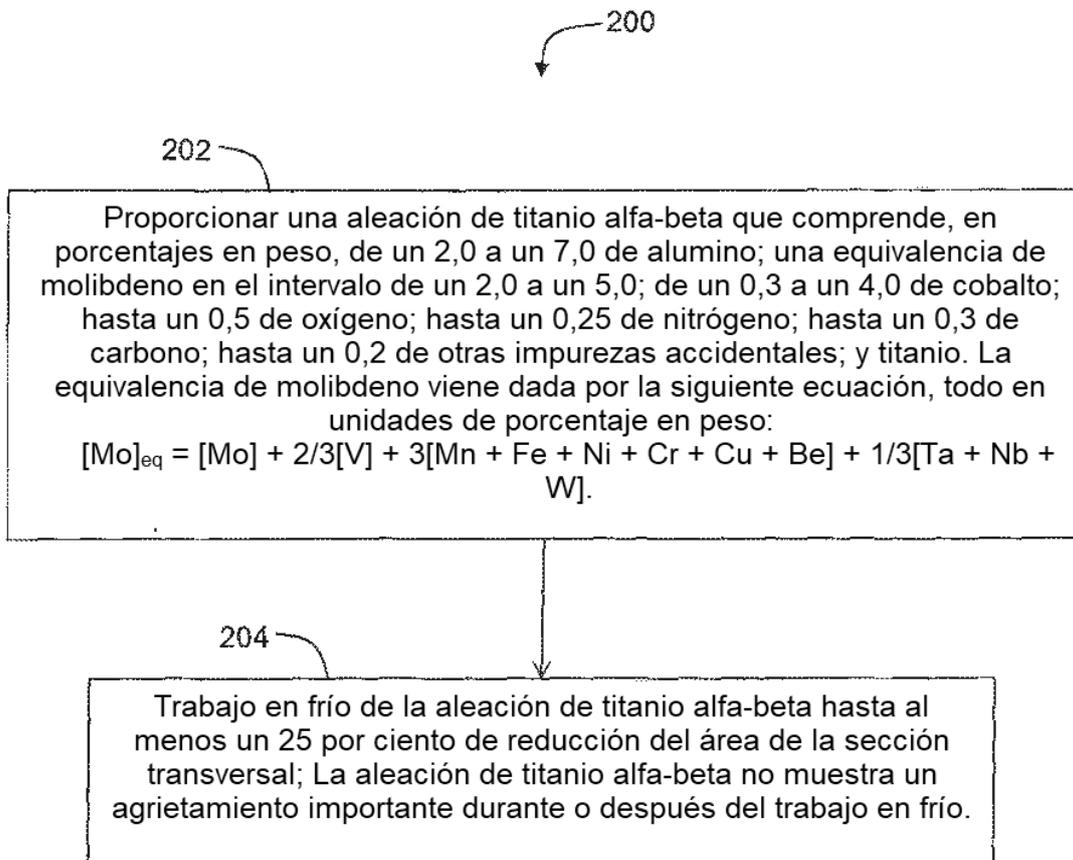


FIG. 2