

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 752 551**

51 Int. Cl.:

**B23K 20/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **31.10.2016 PCT/AT2016/060093**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.05.2017 WO17070725**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.10.2016 E 16808550 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019 EP 3368241**

54 Título: **Herramienta de soldadura por fricción agitación**

30 Prioridad:

**30.10.2015 AT 7022015**

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

**06.04.2020**

73 Titular/es:

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN (50.0%)**

**Karlsplatz 13**

**1040 Wien, AT y**

**STIRTEC GMBH (50.0%)**

72 Inventor/es:

**GIERL-MAYER, CHRISTIAN;**

**DANNINGER, HERBERT;**

**WEINBERGER, THOMAS y**

**FIGNER, GUNTER**

74 Agente/Representante:

**CAPITAN GARCÍA, Nuria**

ES 2 752 551 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**

Herramienta de soldadura por fricción agitación

**5 Campo técnico de la Invención**

La presente invención se refiere a herramientas de soldadura por fricción agitación de metales o aleaciones resistentes a altas temperaturas.

**10 Antecedentes de la Invención**

La soldadura por fricción agitación es un procedimiento de soldadura conocido desde hace aproximadamente dos décadas, en el que una herramienta, que se compone de un eje simétrico en rotación, usualmente cilíndrico, que presenta un pasador saliente con menor diámetro en un extremo partiendo de una región de hombro del eje, con el extremo en el lado del pasador se coloca en las piezas de trabajo a conectar y se pone en rotación. Gracias a la rotación del pasador y de la región de hombro adyacente y el calor por fricción resultante de ello se calientan los materiales de las piezas de trabajo a conectar y se vuelven pastosos. Tan pronto como los materiales de las piezas de trabajo a conectar sean suficientemente pastosos, el pasador se ocupa de una mezcla íntima de los materiales de las piezas de trabajo a conectar en la región de conexión. Luego, cuando las piezas de trabajo se enfrían en el área de la zona de engranaje del pasador, se produce un punto de soldadura mejorado en comparación con los procedimientos de soldadura convencionales, que en particular puede estar libre de poros y/o microestructuras no deseadas. Este procedimiento elimina varias desventajas de la soldadura por fusión porque es un procedimiento en fase sólida y evita los problemas conocidos de formación de grano grueso en la soldadura, los efectos de contracción por fusión y las microestructuras desfavorables en la región afectada por el calor.

Aunque todavía es un desarrollo tecnológico reciente, la soldadura por fricción agitación ya se usa en muchos campos de aplicación, ante todo para soldar piezas de trabajo de materiales de bajo punto de fusión, por ejemplo, las aleaciones de aluminio. Para los metales ligeros, en particular las chapas, el procedimiento también se introduce en el campo aeronáutico y aeroespacial, que de forma conocida establece altas exigencias en términos de calidad y fiabilidad.

Más recientemente, también se intenta obtener las ventajas obtenidas por la soldadura por fricción agitación en la soldadura de materiales de punto de fusión más elevado, por ejemplo, el acero. Sin embargo, un problema consiste ahora en que las herramientas de soldadura por fricción agitación utilizadas a menudo se deforman a altas temperaturas de soldadura o se desgastan rápidamente. Además, en el proceso de soldadura se puede producir un desprendimiento o ruptura del pasador o pin del eje o se puede romper el eje mismo.

La combinación requerida por las herramientas de alta dureza en caliente, resistencia al calor y tenacidad, en particular en el caso de sollicitaciones a flexión circunferencial, y la resistencia al desgaste en caliente actualmente no se alcanzan por los materiales comercialmente accesibles, por lo que las duraciones y vidas útiles de las herramientas son intolerablemente cortas. A diferencia de las herramientas para la soldadura de aluminio, estas herramientas a menudo solo alcanzan vidas útiles de unos pocos metros.

Los aceros de trabajos en caliente usados para la soldadura por fricción agitación de aluminio fallan a las temperaturas mucho más altas, que aparecen en la soldadura por fricción agitación de materiales ferrosos y de acero. Incluso los metales duros de carburo de tungsteno-cobalto fallan debido al ablandamiento del aglutinante de cobalto. Las aleaciones de tungsteno-renio muestran un potencial interesante; debido al precio muy elevado del renio, esta solución no es comercialmente factible. Aunque otros metales refractarios como el molibdeno muestran la resistencia al calor requerida, pero presentan un alto desgaste, lo que tiene un impacto negativo en la seguridad del proceso. En principio, sin embargo, los metales refractarios tienen la ventaja, en comparación con la cerámica o el metal duro, de que el contorno se puede mecanizar de nuevo según el desgaste correspondiente y, por lo tanto, la herramienta se puede reutilizar varias veces.

Además de los mecanismos de falla clásicos, como el desgaste abrasivo o la fractura por fatiga, la interacción química entre la herramienta y las piezas de trabajo a conectar es un factor importante que, sin embargo, apenas se considera en la literatura. La alta velocidad relativa de los componentes involucrados, en combinación con las altas temperaturas y las presiones aplicadas, conduce a reacciones triboquímicas, principalmente interacciones químicas entre los socios, que pueden deteriorar tanto la herramienta como la pieza de trabajo.

- La reacción triboquímica más frecuente, la tribo-oxidación por reacción de los componentes involucrados con el oxígeno atmosférico circundante, se puede impedir llevando a cabo el procedimiento FSW bajo gas inerte. Pero no se puede impedir la interdifusión de los componentes de la herramienta y las piezas de trabajo o reacciones entre sí. Esto conduce a la adhesión y soldadura del material de la pieza de trabajo a la herramienta. Al soltarse estas adherencias en el curso del proceso posterior, el material de la herramienta también se suelta y la superficie de la herramienta se destruye progresivamente con ello. Tales efectos aparecen, por ejemplo, ya en la soldadura por fricción agitación de aluminio con herramientas de acero de trabajo en caliente después de un cierto período de uso y conducen a una falla rápida de la herramienta.
- También se deben considerar las reacciones químicas clásicas de los componentes de la herramienta con las piezas de trabajo. Así, por ejemplo, el nitruro de boro cúbico (véase el documento US 2002/011509 A1) denominado en la literatura de patentes como "superabrasivo" y recomendado para herramientas de soldadura por fricción agitación debido a su alta dureza y resistencia al desgaste, a menudo se descompone muy rápidamente en contacto con superficies metálicas en condiciones de soldadura por fricción agitación. Esto se determina de forma unívoca, por ejemplo, para la soldadura por fricción agitación de materiales de Ti con herramientas que contienen cBN [Y. Zhang, Y.S. Sato, H. Kokawa, S.H.C. Park y S. Hirano, "Stir zone microstructure of commercial purity titanium friction stir welded using pcBN tool", *Materials Science and Engineering A*, 488, 25-30 (2008)].
- Otro punto de vista es la contaminación de los cordones de soldadura por fricción agitación con el material retirado de la herramienta. Dado que esta retirada no se puede evitar debido al sistema, son deseables aquellos materiales de herramientas que no causan efectos negativos sobre las propiedades mecánicas o químicas en las piezas a conectar (como p. ej. fases extrañas frágiles) en tanto que se disuelven en la red básica como cristal mixto. Al usar herramientas pcBN para soldar acero se pudieron encontrar fases  $\sigma$  y boruros ricos en Cr en el área de la zona de agitación del material. En particular con los aceros austeníticos, de este modo se reduce la resistencia a la corrosión en el cordón de soldadura, lo que sin embargo se debe evitar sin falta [Y. S. Sato, M. Muraguchi, H. Kokawa, "Tool Wear and Reactions in 304 Stainless Steel during Friction Stir Welding", *Materials Science Forum*, Vol. 675-677, p. 731-734 (febrero de 2011)].
- Para mejorar las propiedades mecánicas del material de la herramienta, ante todo a altas temperaturas, se pueden agregar dispersoides estabilizadores de la estructura por medio de técnicas conocidas per se para metales refractarios monolíticos, es decir, carburos finos, óxidos, nitruros o boruros con un diámetro medio de partículas en el rango de nanómetros, es decir,  $<1 \mu\text{m}$ , que aumentan la dureza en caliente y la resistencia al calor y reducen la tendencia de en particular Mo y también W al engrosamiento microestructural a temperaturas más altas [véase p. ej. Leichtfried, G. Thurner, R. Weirather, *Proc. 14th Int. Plansee Seminar*, Reutte, Vol. 4, pág. 26-43 (1997)].
- Además, se añaden carburos y otros materiales resistentes a altas temperaturas en ciertas cantidades para aumentar la resistencia al calor y reducir el desgaste. Por ejemplo, en el documento GB 2.402.905 A de 2004 se da a conocer una herramienta de soldadura por fricción agitación descrita arriba de tungsteno o una aleación a base de tungsteno, que comprende preferiblemente un material que aumenta la resistencia, seleccionado entre renio, molibdeno, tántalo y niobio, en particular renio en solución sólida, preferiblemente en una cantidad de aproximadamente el 40% en peso, y además también puede comprender uno o más carburos refractarios en una concentración de aproximadamente el 0,25 a aproximadamente el 2% en peso. Ejemplos de esto último incluyen carburos de hafnio, circonio, tantalio y niobio. La producción se realiza, entre otras cosas, mediante prensado isostático en frío.
- En el documento EP 2.076.352 B1 y el documento WO 2008/102209 A2 subyacente se describe una herramienta de soldadura por fricción agitación con una sección de hombro de W, Mo, Ta, Nb y/o Hf aleados eventualmente y una sección de pasador de uno o varios de Mo, W, Hf, Zr, Ta, Rh, Nb, Ir, V, aleaciones, carburos y óxidos de los mismos, en donde la última comprende en particular 0,001 a 5% en peso de carburos y/o nitruros de La, Hf y/o Zr. Ambas secciones también pueden presentar un recubrimiento, así p. ej. un recubrimiento de rutenio, siliciuros o carburos. Sin embargo, los óxidos y carburos se sitúan ante todo superficialmente y, a veces, solo en el revestimiento de la sección correspondiente, y se producen, por ejemplo, mediante pulverización catódica con magnetrón o pulverización térmica. No se indican los tamaños de partículas de tales óxidos y carburos.
- En el documento US 2014/299651 A1 se describen herramientas de soldadura por fricción agitación que, de forma análoga al documento GB 2.402.905 A arriba mencionado, comprenden eventualmente uno o más carburos refractarios de Hf, Zr, Ta y/o Nb. Sin embargo, ni las cantidades de estos carburos refractarios se especifican más, ni se indican los tamaños de partícula.

La finalidad de estos aditivos conocidos de carburos y óxidos, que generalmente presentan tamaños de partículas  $<1 \mu\text{m}$  ("dispersoides") es, como se mencionó al inicio, una estabilización de la microestructura o aumentar la resistencia a la temperatura de la aleación base respectiva. Los efectos significativos sobre la resistencia al desgaste o el coeficiente de fricción de la herramienta no son suficientes de hecho.

5

Para esta última finalidad, como los únicos documentos conocidos por los inventores, el documento US 2002/011509 A1 y otros miembros de la familia de patentes dan a conocer una herramienta de soldadura por fricción agitación con un recubrimiento de un material abrasivo, específicamente nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) o diamante policristalino (PCD) con tamaños de partículas en el rango por abajo 1 de  $\mu\text{m}$  hasta 50  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, mediante un recubrimiento semejante con material abrasivo, la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo no se aumenta, sino que, por el contrario, debido al menor coeficiente de fricción de PCBN y PCB en comparación con el acero, por ejemplo, incluso se reduce, pero al mismo tiempo se debe aumentar la disipación de calor (véase los párrafos y el documento US 2002/011509 A1). Para mantener una temperatura suficiente en el lugar de soldadura, por lo tanto, a veces se pueden prever barreras térmicas por debajo del recubrimiento de material abrasivo. Como procedimiento para producir tales recubrimientos, se mencionan la deposición química y física de vapor (CVD, PVD) y la implantación de iones. Sin embargo, el documento US 2002/011509 A1 no describe ni un solo ejemplo de realización concreto de dicha herramienta de soldadura por fricción agitación, por lo que la invención y revelación de allí parecen ser de naturaleza puramente teórica.

20

No obstante, en tales herramientas de soldadura por fricción agitación es o sería desventajoso, además de la necesidad de barreras térmicas, el alto desgaste continuo debido a la falta de estabilidad química de los recubrimientos de material abrasivo, como han constatado los inventores en el curso de sus investigaciones.

25

Ante estos antecedentes, el objetivo de la invención era proporcionar una herramienta de soldadura por fricción agitación con la que las desventajas anteriores se pueden eliminar al menos parcialmente.

### Descripción de la Invención

30

Este objetivo lo logra la presente invención en un primer aspecto al proporcionar una herramienta de soldadura por fricción agitación, que comprende un eje simétrico en rotación con un extremo proximal destinado al contacto con los socios de unión y un extremo distal opuesto, así como un pasador dispuesto concéntricamente alrededor del eje de rotación que presenta un diámetro menor que el eje en su extremo proximal y, por lo tanto, sobresale con respecto a una región de hombro del eje así definida, en donde el eje, al menos en esta región del hombro, así como el pasador, se componen respectivamente de un material seleccionado a partir de metales y aleaciones resistentes a altas temperaturas, que eventualmente contienen dispersoides estabilizadores de la estructura, por ejemplo, carburos, óxidos, nitruros o boruros, con un diámetro de partículas en el rango de nanómetros, con la indicación de que el pasador y/o el eje en la región del hombro se compone(n) de un material compuesto o está(n) recubierto(s) con él, que

40

a) que se compone esencialmente de molibdeno, tungsteno, niobio o tántalo o de una aleación basada en al menos uno de estos metales; y

45

b) una fase de refuerzo embebida aquí de al menos un material duro que tiene una dureza Mohs  $\geq 6$ , un tamaño de partículas en el rango de micrómetro y una entalpía libre de formación a 1300 K por debajo de  $-350 \text{ kJ/mol O}_2$ .

50

Al incluir la fase de refuerzo según la invención en una herramienta de soldadura por fricción agitación que se compone esencialmente de molibdeno, tungsteno, niobio y/o tántalo o un recubrimiento de la herramienta en la región del hombro, la resistencia al desgaste de la herramienta se puede aumentar considerablemente respecto al estado de la técnica. Al embeber las partículas de grano relativamente grueso de la fase de refuerzo, que preferiblemente comprende uno o varios materiales duros con un tamaño de partículas en el rango de 3 a 200  $\mu\text{m}$ , preferentemente de 5 a 200  $\mu\text{m}$ , más preferiblemente de 10 a 200  $\mu\text{m}$ , estas están distribuidas uniformemente en la base metálica y aseguradas contra roturas mucho mejor que el caso con materiales duros generados solo superficialmente según el estado de la técnica. Además, el tamaño de grano aumentado en varias potencias de diez respecto a los dispersoides provoca un aumento aun esencialmente más intenso de superficie, lo que aumenta considerablemente la estabilidad mecánica del compuesto y conduce a una vida útil de la herramienta prolongada drásticamente. El comportamiento químicamente inerte del material duro respecto a las piezas de trabajo a unir debido a la entalpía libre de formación fuertemente negativa (más negativa que  $-350 \text{ kJ/mol O}_2$ ) reduce significativamente la tendencia a la soldadura de los materiales de la pieza de trabajo a la

60

herramienta y, por lo tanto, minimiza el deterioro asociado y la formación de fases no deseadas después de la entrada al material a unir.

5 De los metales apropiados debido a sus altos puntos de fusión de aproximadamente 2300 K como base para el material compuesto según la invención y aleaciones adecuadas de los mismos, es decir, Mo, W, Nb y Ta (y en principio también Os, que difícilmente se considerará debido a su alto precio), se prefieren particularmente el Mo, W y las aleaciones basadas en ellos como componentes principales del material compuesto debido a su baja solubilidad para y en hierro y aluminio, dos de los componentes más  
10 comunes en los socios de unión en la soldadura por fricción agitación, y los bajos coeficientes y velocidades de difusión de los metales individuales en tales combinaciones, dado que así la formación de fases indeseables y la soldadura del material de la pieza de trabajo a la herramienta se puedan reducir aún más.

15 En formas de realización preferidas, el al menos un material duro está contenido en el material en una proporción de 5 a 30% en volumen, preferentemente de 10 a 20% en volumen, y por lo tanto en una cantidad que está muy por encima de en la que se han utilizado los materiales duros de grano fino como dispersoides y mejora aún más el efecto inhibitor del desgaste de la invención.

20 El al menos un material duro de fase de refuerzo está seleccionado preferentemente entre óxido de aluminio, óxido de circonio, óxido de itrio y mezclas de los mismos, ya que estos materiales presentan una estabilidad termodinámica especialmente alta y, por lo tanto, no reaccionan o solo de manera mínima con los materiales de la pieza de trabajo tales como acero, acero inoxidable, aleaciones aluminio y superaleaciones. A pesar de su dureza particularmente alta, los materiales abrasivos PCBN y PCD dados a conocer en el documento US 2002/011509 A1 mencionado al inicio son totalmente inadecuados para  
25 las herramientas según la presente invención, ya que tienen una entalpía de formación (muy) demasiado alta (entalpía de formación estándar  $\Delta H_f^\circ$ : nitruro de boro -254,4 kJ/mol, diamante +1,9 kJ / mol;  $\Delta H_f$  para CBN a 1300 K:  $\approx$  -265 kJ / mol) y, por lo tanto, reacciones (muy) fáciles con el material de los socios de unión en la soldadura por fricción agitación.

30 Además, el material de la herramienta de soldadura por fricción agitación según la invención puede comprender dispersoides con diámetros de partículas en el rango de nanómetros de una manera conocida en sí en una cantidad de hasta 5% en peso, a fin de aprovechar el efecto estabilizador de la estructura de estos aditivos.

35 La disposición del material compuesto en o sobre la herramienta según la invención no está particularmente limitada, y tanto el pasador como también la región del hombro o el eje completo, es decir, la herramienta completa, se pueden componer del material compuesto. Sin embargo, principalmente por razones de costo, solo partes de la herramienta, preferiblemente el pasador, se compondrán enteramente del material compuesto, mientras que otras partes, preferentemente la región  
40 del hombro del eje, estarán revestidas solo con una capa que se compone del material compuesto. De manera especialmente preferible, el material compuesto está previsto en todas aquellas partes que entran en contacto con los socios de unión durante el proceso de soldadura.

45 La producción de la herramienta según la invención se puede realizar por métodos conocidos de metalurgia de polvos, por ejemplo, de manera análoga a la producción de los materiales producidos industrialmente TZM o MHC, de modo que las nuevas herramientas se puedan fabricar en las instalaciones de producción existentes. Un procedimiento a modo de ejemplo se expone en los ejemplos posteriores.

50 En un segundo aspecto, la invención proporciona el uso de la herramienta de soldadura por fricción agitación según el primer aspecto en un procedimiento de soldadura, es decir, un procedimiento para la soldadura por fricción agitación, que se caracteriza porque dicha herramienta de soldadura por fricción agitación se usa como herramienta.

#### 55 **Breve descripción de las Figuras**

En los siguientes ejemplos, la presente invención se describirá adicionalmente en referencia a los dibujos adjuntos, que muestran lo siguiente.

60 La fig. 1 es una fotografía de la superficie de una herramienta de soldadura por fricción agitación según el estado de la técnica del ejemplo de comparación 1.

La fig. 2 es una fotografía de la superficie de una herramienta de soldadura por fricción agitación según el estado de la técnica del ejemplo de comparación 2.

La fig. 3 es una fotografía de la superficie de una herramienta de soldadura por fricción agitación del ejemplo 1.

## 5 **Exposición Detallada de la Invención**

### *Descripción general del procedimiento*

10 En el siguiente ejemplo de comparación y un ejemplo de la presente invención, las herramientas de soldadura por fricción agitación se han fabricado en primer lugar según el mismo procedimiento conocido en general, en donde el procedimiento comprendió lo siguiente:

15 - mezcla del polvo de metal base con el polvo de material duro (en donde se mezclan eventualmente dispersoides opcionales con este último), por ejemplo, por medio de unas cubas giratorias durante 30 minutos;

- consolidación de la mezcla de polvo por prensado isostático en frío, p. ej. a 300 MPa;

20 - pre-sinterización en una atmósfera reductora, p. ej., en hidrógeno a 1200 °C durante 60 min;

- encapsulado en envases de acero herméticos a gases, evacuación y soldadura;

- compactación isostática en caliente, p. ej. a 1300 °C;

25 - retirada de la cápsula por mecanizado con arranque de virutas (torneado a medida);

- conformado en caliente, p. ej. laminado en caliente a una temperatura de precalentamiento de 1.200 °C;

30 en donde los dos últimos pasos también se pueden realizar en el orden inverso.

Las herramientas así obtenidas fueron sometidas a un ensayo de vida útil. Para ello se han probado diferentes materiales de herramientas en las mismas condiciones marco en una aleación de aluminio. Los parámetros de soldadura fueron idénticos para todas las herramientas y se orientaron a una aplicación industrial específica. Después de cierto recorrido de soldadura, las herramientas fueron examinadas respecto al desgaste.

35

Las superficies obtenidas a ese respecto se han verificado visualmente y comparado. Las fotografías de las superficies respectivas se muestran en las figuras 1 a 3 adjuntas.

## 40 **Ejemplos de comparación 1 y 2**

En estos ejemplos, las herramientas se fabricaron, por un lado, de acero para trabajo en caliente EN X40CrMoV5-1, que posteriormente se ha curado a 54 HRC (ejemplo de comparación 1) y, por otro lado, de Inconel® Alloy 718, NiCr19NbMo, una aleación a base de níquel (ejemplo de comparación 2). Estos materiales se mencionan con frecuencia en la literatura especializada para su uso como herramientas de soldadura por fricción agitación (véase p. ej. Y.N. Zhang, X. Cao\*, S. Larose und P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing", Can. Metall. Quart. 51(3), 250-261 (2012)).

45

A este respecto, las fotografías de las superficies obtenidas de las herramientas se muestran en las figuras 1 y 2.

50

De la fig. 1, una toma de la herramienta de soldadura por fricción agitación del ejemplo de comparación 1 después de un recorrido de soldadura de 650 m, la formación de marcas de traqueteo en el hombro es claramente evidente. Estas marcas de traqueteo se forman debido a la mala resistencia química del material de la herramienta durante el proceso de la soldadura por fricción agitación en contacto con el material de la pieza de trabajo. Debido al movimiento de agitación, un compuesto de material se forma localmente a partir de fracciones de la herramienta y la pieza de trabajo, por lo que las fracciones de volumen del material de la herramienta se arrancan de la herramienta. La fig. 1 muestra además de las marcas de traqueteo también esta pérdida de volumen con bastante claridad.

60

En la fig. 2 está representada la superficie correspondiente de la herramienta de soldadura por fricción agitación del ejemplo de comparación 2 después de un recorrido de soldadura de 400 m. Nuevamente, las marcas de traqueteo correspondientes y el desgaste químico son claramente visibles.

**Ejemplo 1**

Se hizo una herramienta ilustrativa de soldadura por fricción agitación de la presente invención según el procedimiento arriba mencionado a partir de los siguientes componentes:

5

- polvo de molibdeno ( $\varnothing < 32 \mu\text{m}$ );

- 10% en volumen de corindón fusionado (bloque,  $\varnothing 25\text{-}63 \mu\text{m}$ ), 0.5% en peso de HfC ( $\varnothing < 1 \mu\text{m}$ , dispersoide).

10

La herramienta de soldadura por fricción agitación así obtenida según la invención se ha sometido a un test análogo a las herramientas de los ejemplos de comparación.

15

La fig. 3 es una fotografía de la superficie de la herramienta de la invención después de 1500 m de recorrido de soldadura. Aquí, al contrario del estado de la técnica, solo se puede reconocer un desgaste abrasivo relativamente ligero. Debido a la mejor resistencia química, casi no hubo interacciones con la pieza de trabajo.

20

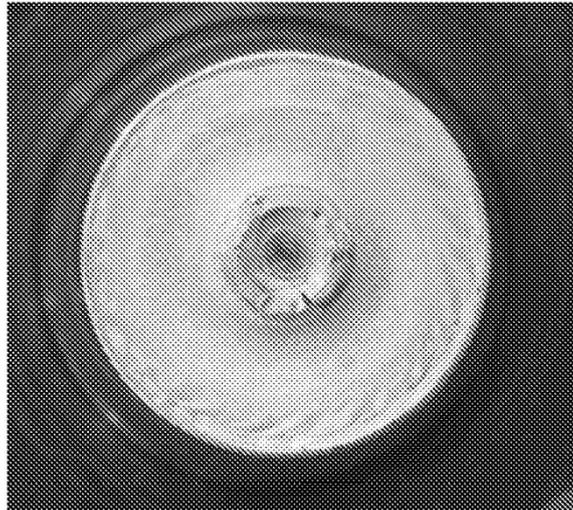
Gracias a la invención se proporcionan por consiguiente herramientas de soldadura por fricción agitación significativamente mejoradas en su estabilidad química, que ofrecen ventajas económicas extraordinarias en el campo de la soldadura por fricción agitación.

25

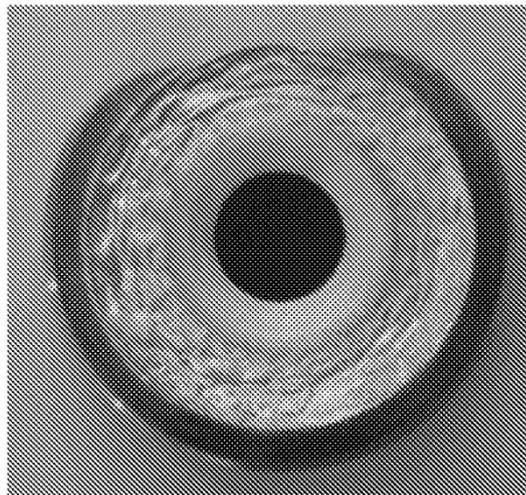
Tal herramienta según la invención permite, por lo tanto, vidas útiles claramente más largas que las que se podían lograr según el estado de la técnica.

## REIVINDICACIONES

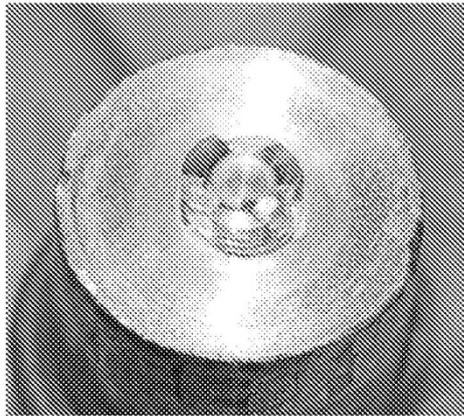
- 1.- Herramienta de soldadura por fricción agitación, que comprende (1) un eje simétrico en rotación con un extremo proximal (1a) destinado al contacto con los socios de unión y un extremo distal opuesto (1b) y un pasador (2) dispuesto concéntricamente alrededor del eje de rotación, que presenta un diámetro menor que el eje en su extremo proximal (1a) y por lo tanto sobresale con respecto a una región de hombro (3) definida de ese modo del eje, en donde el eje, al menos en esta región de hombro (3), y el pasador (2), se compone(n) respectivamente de un material compuesto o está(n) recubierto(s) con él, que comprende una base metálica que se compone esencialmente de molibdeno, tungsteno, niobio o tántalo o de una aleación basada en al menos uno de estos metales y partículas de material duro embebidas en la base metálica con una dureza de Mohs  $\geq 6$ ; en donde las partículas de material duro embebidas en la base metálica comprenden al menos un material duro que forma una fase de refuerzo en la base metálica y presenta una entalpía libre de formación a 1300 K que es más negativa que  $-350 \text{ kJ/mol O}_2$ , **caracterizada por que** el material duro presenta un tamaño de partículas en el rango de micrómetros, es decir, con un diámetro medio de partículas de  $1 \mu\text{m}$ .
- 2.- Herramienta según la reivindicación 1, **caracterizada por que** la fase de refuerzo comprende uno o varios materiales duros con un tamaño de partículas en el rango de 3 a  $200 \mu\text{m}$ , preferentemente de 5 a  $200 \mu\text{m}$ , todavía más preferiblemente de 10 a  $200 \mu\text{m}$ .
- 3.- Herramienta según la reivindicación 1 o 2, **caracterizada por que** al menos un material duro está contenido en el material en una proporción del 5 al 30% en volumen, preferentemente del 10 al 20% en volumen.
- 4.- Herramienta según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizada por que** el al menos un material duro de la fase de refuerzo está seleccionado de óxido de aluminio, óxido de circonio, óxido de itrio y mezclas de los mismos.
- 5.- Herramienta según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** el material compuesto se compone esencialmente de Mo y/o W o de una aleación basada en los mismos.
- 6.- Herramienta según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** el material comprende dispersoides con diámetros de partículas en el rango de nanómetros en una cantidad de hasta el 5% en peso.
- 7.- Herramienta según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada por que** el pasador (2) se compone del material compuesto y la región de hombro (3) del eje (1) está recubierta con una capa que se compone del material compuesto.
- 8.- Procedimiento para la soldadura por fricción agitación, **caracterizado por que** como herramienta se utiliza una herramienta de soldadura por fricción agitación según una de las reivindicaciones 1 a 7.



**Figura 1**



**Figura 2**



**Figura 3**