

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 376**

51 Int. Cl.:

B23K 1/00	(2006.01)	C22F 1/10	(2006.01)
B23K 1/19	(2006.01)	F01D 5/00	(2006.01)
B23K 1/005	(2006.01)	B23K 26/342	(2014.01)
B23K 9/23	(2006.01)	B23K 101/00	(2006.01)
B23K 35/30	(2006.01)	B23K 103/02	(2006.01)
B23K 9/04	(2006.01)	B23K 103/18	(2006.01)
B23K 26/32	(2014.01)		
B23K 35/02	(2006.01)		
B23K 35/22	(2006.01)		
C21D 9/50	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.12.2012 PCT/CA2012/001118**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **12.06.2014 WO14085892**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.12.2012 E 12889603 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 2822726**

54 Título: **Método de revestimiento y soldadura de fundición de superaleaciones usando polvo de relleno de material compuesto**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.02.2020

73 Titular/es:
**LIBURDI ENGINEERING LIMITED (100.0%)
400 Highway 6 North
Dundas, Ontario L9H 7K4, CA**

72 Inventor/es:
**GONCHAROV, ALEXANDER B.;
LIBURDI, JOSEPH;
LOWDEN, PAUL y
HASTIE, SCOTT**

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 742 376 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

Método de revestimiento y soldadura de fundición de superaleaciones usando polvo de relleno de material compuesto

Campo de la invención

5 La invención se refiere a la soldadura de fundición y a los materiales de relleno para la soldadura de fundición y se puede usar para la fabricación y reparación de componentes de motores de turbina hechos de superaleaciones a base de níquel, cobalto y hierro utilizando soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), soldadura manual y automática por rayo láser (LBW), haz de electrones (EBW), plasma (PAW) y microplasma (MPW) (todos por sus siglas en inglés).

Antecedentes de la invención

10 La presente invención se refiere a la soldadura de fundición y puede usarse para unir, fabricar y reparar artículos, especialmente componentes de motores de turbina, fabricados con superaleaciones policristalinas convencionales, monocristalinas y solidificadas direccionalmente utilizando procedimientos de soldadura de fundición.

15 En la Patente Estadounidense US 2003/0136811 A1 se describe un método para la fabricación o reparación de un componente de turbina de gas de superaleación que incluye un procedimiento de ligadura por difusión en fase líquida, en el que el tratamiento por calor de soldadura fuerte usado para la ligadura por difusión de un material en polvo al componente se lleva a cabo mediante un ciclo de calor que se realiza en el componente para otro propósito. Como tratamiento por calor de soldadura fuerte se puede usar un tratamiento por calor de solución de fabricación, un tratamiento por calor previo a la soldadura, un tratamiento por calor posterior a la soldadura o un tratamiento por calor renovador. La composición del material en polvo se selecciona de manera que se logre un conjunto deseado de propiedades del material cuando el material en polvo se someta al ciclo de calor de doble propósito.

20 En la soldadura de fundición, la coalescencia o unión entre dos o más artículos tiene lugar mediante la fusión de un material de base con o sin introducción de un material de relleno, seguido por el enfriamiento y la cristalización de un baño de soldadura. La soldadura de fundición puede producir propiedades iguales a las del material de base en un amplio rango de temperaturas y estados. Sin embargo, la acomodación de la solidificación y las tensiones residuales a menudo da como resultado el agrietamiento de Inconel 713, Inconel 738, Rene 77, CMSX-4, Rene N4 y otras superaleaciones con baja ductilidad difíciles de soldar.

La soldadura fuerte puede producir uniones sin grietas porque no se requiere la fusión de un material de base para obtener la coalescencia. La soldadura fuerte tiene lugar por fusión y solidificación de solo materiales de soldadura fuerte. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las uniones soldadas fuerte normalmente están por debajo de las propiedades mecánicas del material de base en un porcentaje entre un 50 % y 75 % a alta temperatura.

30 Las deficientes propiedades mecánicas de las uniones soldadas fuerte producidas por la mayoría de los materiales de soldadura fuerte de níquel y cobalto no permiten una restauración dimensional extensa de las aspas de la turbina y otros componentes del motor.

Por lo tanto, a pesar de la propensión al agrietamiento, la soldadura se usa con más frecuencia que la soldadura fuerte para la fabricación y reparación de diferentes artículos, incluidos los componentes del motor de turbina.

35 Por ejemplo, la reparación de las aspas de la turbina según la Patente Internacional WO 2009012747 se hace mediante la eliminación de una porción dañada de un aspa y luego se reconstruye la porción eliminada mediante una acumulación de soldadura usando LBW, también conocido como revestimiento con un material de relleno en polvo.

El método descrito en la Patente Europea EU 102004002551 comprende la eliminación del material dañado, la deposición de polvo con láser en el área de reparación y el mecanizado para obtener el perfil requerido.

40 Un método similar se describe en la Patente Estadounidense US 6,269,540. Comprende el revestimiento usando un rayo láser que se mueve en relación con una superficie de reparación y material de relleno que se suministra a la superficie de tal manera que el rayo láser funde una capa delgada del sustrato metálico y de material de relleno que forma un metal fusionado en una superficie del aspa. Este procedimiento se repite hasta que se restaura por completo una sección deseada del aspa.

45 Las aspas de la turbina de baja ductilidad fabricadas con superaleaciones que endurecen por precipitación a base de níquel y cobalto y solidificadas direccionalmente son altamente susceptibles de agrietarse durante la soldadura y el tratamiento por calor.

50 Por lo tanto, para evitar el agrietamiento durante la soldadura de fundición, las aspas de la turbina fabricadas con materiales con baja ductilidad se precalientan antes de soldarlas a una temperatura entre 1800 °F (982 °C) y 2100 °F (1148 °C) según la Patente Estadounidense US 5,897,801. La soldadura se lleva a cabo mediante golpe de arco en el área preseleccionada para fundir localmente el material de origen, proporcionando un metal de relleno que tiene la misma composición que la superaleación a base de níquel del artículo y alimentando el metal de relleno en el arco que da como resultado la fusión y la fundición de este último con el material de origen formando un depósito de soldadura en la solidificación.

Una propuesta similar de soldadura a alta temperatura se utiliza en el método descrito en la Patente Estadounidense US 6,659,332. El artículo se repara eliminando el material dañado, que está presente en el área defectuosa, seguido del precalentamiento del artículo a una temperatura en el intervalo de un 60 % a 98 % de la temperatura del sólido del material de base en una cámara que contiene un gas protector.

5 Con el fin de minimizar el estrés de soldadura en el aspa debido a la aplicación de una energía térmica considerable durante los procedimientos de soldadura de fundición, las aspás se someten a un calentamiento controlado antes y control de la refrigeración después de la reparación por soldadura de acuerdo con el método descrito en la Patente Canadiense CA 1207137.

10 El precalentamiento de las aspás de la turbina aumenta el coste de una reparación y no garantiza soldaduras sin grietas debido a la baja ductilidad de los componentes producidos mediante el uso de superaleaciones de endurecimiento por precipitación.

15 El procedimiento de sinterización directa de metal por láser según la Patente Estadounidense US 2010221567 comprende las etapas de aplicar un material de revestimiento con una temperatura de fusión que está por debajo de la temperatura de fusión del sustrato al menos a una porción del artículo y calentar el material de revestimiento a una temperatura que supere la temperatura del líquido permitiendo la humectación de la superficie y la formación de un compuesto sólido durante el enfriamiento y la solidificación posteriores. Para evitar la oxidación, este procedimiento tiene lugar al vacío o en atmósfera protectora. Este método se basó en los procedimientos de soldadura fuerte a alta temperatura descritos en las Patentes Estadounidenses US 6,454,885, US 6,383,312, US 6,454,885, US 8,123,105, US6872912 B1 y otra técnica anterior y, por lo tanto, tiene defectos similares.

20 La principal desventaja de este método es una refusión completa de las soldaduras de soldadura fuerte durante la solución de soldadura posterior o el tratamiento por calor de renovación que cambia la geometría de los cordones de soldadura limitando el tamaño de las áreas de reparación para una sola pasada.

25 Además, tal como se descubrió en experimentos con soldaduras en estado soldadas producidas usando materiales de soldadura fuerte a base de Ni y Co con altos contenidos de depresores del punto de fusión como B y Si, son propensos a un craqueo extensivo y, por lo tanto, no son adecuados para su uso en el estado «tal como se soldó».

Los intentos anteriores de producir soldaduras sin grietas en Inconel 738 usando materiales de relleno estándar no tuvieron éxito de acuerdo con Banerjee K., Richards N. L. y Chaturvedi M. C. «Efecto de las aleaciones de relleno en el agrietamiento de la zona afectada por el calor en las soldaduras de arco de tungsteno-gas de IN-738 LC tratadas por calor antes de la soldadura», *Metallurgical and materials transactions*, volumen 36A, julio de 2005, pp. 1881-1890.

30 Para verificar los resultados anteriores dentro del alcance del desarrollo actual, la evaluación de la soldabilidad de Inconel 738 usando materiales de soldadura homogéneos estándar que incluyen alambres de soldadura a base de níquel AMS 5786 (Hastelloy W) y AMS 5798 (Hastelloy X), estándares, que comprenden numerosos elementos de aleación, incluidos Si con un contenido en estado combinado de 0,2 % a 1 % en peso, alambre de soldadura a base de níquel Haynes HR-160 con un contenido de silicio en estado combinado de 2,75 % en peso, aleaciones a base de níquel con un contenido de Si en un intervalo de 0,05 % en peso a 2 % en peso similar al material descrito en la Patente Estadounidense US 2,515,185 y se efectuó una superaleación a base de níquel más compleja que comprendía hasta un 0,05 % en peso de B y un 2,0 % en peso de Re según la Patente Estadounidense US 6,468,367.

40 Independientemente de la composición química, todas las soldaduras producidas usando materiales de soldadura estándar a temperatura normal mostraron un microcraqueo intergranular extenso en la ZAC (zona afectada por el calor) a lo largo de la línea de fusión entre el material de base y los cordones de soldadura.

45 El agrietamiento de la ZAC en Inconel 738 se relacionó con una fusión incipiente de eutécticos a baja temperatura, carburos y otras precipitaciones a lo largo de los límites de grano durante la soldadura, seguida de una propagación de grietas debido a un alto nivel de tensiones de tracción residuales en la ZAC. La falta de eutécticos a baja temperatura y el enfriamiento rápido no permitieron el relleno completo de grietas durante la soldadura, como lo demostraron Alexandrov B. T., Hope A. T., Sowards J. W., Lippold J. C. y McCracken S. S., en la publicación titulada: *Weldability studies of high-Cr, Ni-base filler metals for power generation applications, welding in the world*, vol. 55, n.º 3/4, pp. 65 - 76, 2011 (doc. IIW-2111, exdoc. IX-2313-09).

50 El tratamiento por calor posterior a la soldadura (PWHT, por sus siglas en inglés) de estas soldaduras dio como resultado un agrietamiento por envejecimiento por deformación adicional en la ZAC. Algunas grietas se propagaron en las soldaduras.

Por lo tanto, actualmente, solo el precalentamiento a temperaturas que exceden de 900 °C permite la soldadura sin grietas en Inconel 738, Inconel 713, GDT 111, GDT 222, Mar M247 y otras superaleaciones policristalinas endurecidas por precipitación y solidificadas direccionalmente, gamma prima, así como Mar M 247 , CMSX 4, CMSX 10, Rene N5 y otros materiales monocristalinos.

55 Sin embargo, el precalentamiento de los componentes del motor de turbina antes de la soldadura aumenta el coste y reduce la productividad de las operaciones de soldadura.

Por lo tanto, uno de los objetivos principales de la presente invención es el desarrollo de un nuevo método rentable para soldar y revestir superaleaciones policristalinas, solidificadas direccionalmente y monocristalinas a temperatura normal que permita la autorecuperación de las grietas durante la soldadura y el tratamiento por calor posterior a la soldadura.

- 5 Además, es otro objetivo desarrollar parámetros para un tratamiento por calor posterior a la soldadura (PWHT) para la autorecuperación de las grietas durante una PWHT.

Breve descripción de la invención

10 El método de revestimiento y soldadura por fundición incluye las etapas de una aplicación de un polvo de relleno compuesto que contiene un porcentaje de un 5 % a 50 % de polvo de soldadura fuerte y de un 50 % a 95 % de polvo de soldadura de alta temperatura a un material de base y al mismo tiempo se calienta el material de base y un polvo de relleno de material compuesto por una fuente de calor de soldadura local. El polvo de relleno se calienta a una temperatura que fundirá completamente el polvo de soldadura fuerte y fundirá al menos parcialmente el polvo de soldadura de alta temperatura y también una capa superficial del material de base que produce un baño de soldadura heterogéneo u homogéneo dependiendo de los parámetros de soldadura seguido de una solidificación posterior y enfriamiento de un baño de soldadura formando un cordón de soldadura heterogéneo que comprende un entramado interconectado continuo de dendritas de alta temperatura y una matriz eutéctica interdendrítica. Esta matriz, junto con un tratamiento por calor posterior a la soldadura a una temperatura que exceda de la temperatura del sólido del polvo de soldadura fuerte, pero que esté por debajo de la temperatura del sólido del material de base, permite la autorecuperación de las grietas por fuerzas capilares, mientras que la geometría del cordón de soldadura se soporta mediante el entramado continuo interconectado de dendritas producido por el polvo de soldadura de alta temperatura. El método de revestimiento y soldadura por fundición también incluye las etapas de una aplicación de un polvo de relleno compuesto que contiene entre un 5 % y 50 % de polvo de soldadura fuerte y entre un 50 % y 95 % de polvo de soldadura de alta temperatura a un material de base y simultáneamente calentar el material de base y un polvo de relleno de material compuesto mediante una fuente de calor de soldadura local. El polvo de relleno se calienta a una temperatura que funde completamente el polvo de soldadura fuerte y funde al menos parcialmente el polvo de soldadura a alta temperatura y también una capa superficial del material de base, que produce un baño de soldadura heterogéneo u homogéneo dependiendo de los parámetros de soldadura. Una solidificación de un baño de soldadura homogéneo da como resultado la formación de un cordón de soldadura heterogéneo que comprende un entramado interconectado continuo de dendritas de alta temperatura y matriz eutéctica interdendrítica. Esta matriz, junto con un tratamiento por calor posterior a la soldadura a una temperatura que excede de la temperatura del sólido del polvo de soldadura fuerte, pero que está por debajo de la temperatura del sólido del material de base, permite al menos una fusión parcial de la matriz eutéctica y la autorecuperación de las grietas por fuerzas capilares, mientras que la geometría del cordón de soldadura es soportada por el entramado continuo interconectado de dendritas producido por el polvo de soldadura de alta temperatura.

35 El artículo reparado usando la realización preferida comprende un material de base sin defectos fabricado originalmente con un área dañada que se retira antes de una reparación y se reemplaza con el material de soldadura compuesto que comprende un entramado continuo de dendritas de alta temperatura producidas durante la solidificación de un baño de soldadura y una matriz a base de soldadura fuerte que contiene depresores del punto de fusión.

40 Para garantizar la composición química requerida y la microestructura de las soldaduras, el baño de soldadura se calienta durante la soldadura a una temperatura que excede de la temperatura de fusión del polvo de soldadura fuerte, pero que está por debajo de aproximadamente 1,2 veces la temperatura de fusión del polvo de soldadura de alta temperatura usando una o más pasadas, dependiendo del tamaño requerido de la acumulación de soldadura.

45 De acuerdo con otras realizaciones preferibles, la recuperación de las grietas o el tratamiento térmico se hacen mediante calentamiento local del cordón de soldadura usando una fuente de soldadura. Según otra realización, el tratamiento por calor posterior a la soldadura del artículo a una temperatura por debajo de la temperatura del sólido del polvo de soldadura fuerte, pero por encima de 500 °C permite al menos un alivio de la tensión parcial del material de base.

50 Según otra realización para asegurar la recuperación de las grietas, se hace un tratamiento por calor posterior a la soldadura dentro de un rango sólido-líquido de un material de cordón de soldadura, pero por debajo de la temperatura de sólido del polvo de soldadura a alta temperatura.

55 La soldadura da como resultado la acumulación de tensiones residuales que agravan el agrietamiento. Para reducir las tensiones residuales, se debe realizar el alivio de tensión o el recocido. El tratamiento por calor de recocido y recuperación de las grietas reduce las propiedades mecánicas de un material de base. Por lo tanto, otras realizaciones de la invención actual basadas en los requisitos de rendimiento de los materiales de base y las condiciones de servicio pueden incluir recocido, envejecimiento o combinación de recocido seguido de envejecimiento.

Con el objetivo de reducir la distorsión, las tensiones residuales y el agrietamiento de acuerdo con otra realización, el tratamiento por calor posterior a la soldadura se hace después de la aplicación de 2 a 10 pasadas de soldadura. La

soldadura según la realización preferible se hace usando polvos de soldadura fuerte y polvos de soldadura premezclados con la proporción requerida usando una tolva de polvo o mezclando estos polvos durante el calentamiento con fuentes de soldadura usando dos tolvas de polvo separadas. Las fuentes de soldadura se seleccionan entre láser, haz de electrones, arco eléctrico o plasma.

- 5 Debido a la mejora de la capacidad de soldadura dependiendo de la composición química y el estado del material de base, el artículo previo a la soldadura se somete a un tratamiento por calor de alivio de tensión, envejecimiento o recocido.

De acuerdo con la realización preferible, las soldaduras sin grietas se producen, por ejemplo, cuando la relación entre la longitud del baño de soldadura y la velocidad de soldadura es de 0,002 a 0,02.

- 10 La reparación de un artículo mediante soldadura se puede hacer a temperatura normal sin precalentar el material de base o con el precalentamiento del artículo a una temperatura requerida usando un polvo de soldadura similar con aproximadamente la misma composición química que el material de base o con un polvo de soldadura distinto con una composición diferente como material de base y polvos para soldadura fuerte que incluyen un porcentaje de un 1 % a 10 % en peso de Si o de un 0,2 % a 4 % en peso de B o una mezcla de Si y B como reductores de la temperatura de fusión en el intervalo de un 1,2 % a 10 % en peso con un contenido total de B que no sea mayor que un 4 % en peso.

- 15 En otras realizaciones preferibles, los materiales de soldadura compuestos incluyen polvo de soldadura de alta temperatura y el polvo de soldadura fuerte se usa para producir una pasada de aplicación de un depósito superficial preliminar seguido de soldadura usando un polvo de soldadura de alta temperatura para producir una acumulación de soldadura con la geometría requerida.

- 20 El método inventado se puede usar para la unión de al menos dos artículos, fabricación, reparación y restauración dimensional de componentes estructurales, carcasas, paletas de guía de boquillas, compresores y aspas de turbina fabricados con materiales policristalinos, solidificados direccionalmente, monocristalinos y materiales compuestos.

Se observaron las siguientes ventajas:

- 25 Se ha encontrado que este método produce soldaduras sin grietas a temperatura normal en la mayoría de las superaleaciones policristalinas, solidificadas direccionalmente y monocristalinas con un alto contenido de fase gamma prima y carbono, lo que reduce el coste, aumenta la productividad y mejora la salud y la seguridad de las condiciones de trabajo.

- 30 El método da como resultado la formación de una estructura heterogénea de cordón de soldadura de material compuesto que consiste en un entramado continuo de dendritas de alta resistencia y alta temperatura y una matriz dúctil que produce uniones y metales de soldadura con propiedades mecánicas que exceden las propiedades de las soldaduras homogéneas soldadas fuerte y clásicas hechas usando materiales de relleno endurecedores de la solución estándar.

- 35 La formación de la estructura heterogénea de material compuesto en las soldaduras producidas usando parámetros de soldadura optimizados ocurre a pesar de la fusión de los polvos de soldadura fuerte y de soldadura y el material de base dentro del mismo baño de soldadura.

Las soldaduras depositadas por este método presentan autorrecuperación de las grietas durante el tratamiento por calor posterior a la soldadura, que elimina la necesidad de trabajo costoso de nuevo.

- 40 También exhiben una resistencia superior a la oxidación que excede de la resistencia a la oxidación de los materiales de soldadura de base y de alta temperatura.

Ventajosamente, también hay una amplia ventana de parámetros de soldadura óptimos que simplifican el control del procedimiento.

El presente concepto es un método de revestimiento y soldadura por fundición de superaleaciones que comprende las etapas de:

- 45 a) aplicación de un polvo de relleno de material compuesto que comprende un porcentaje de un 5 % a 50 % en peso de polvo de soldadura fuerte que incluye depresores del punto de fusión que incluyen boro en la cantidad de un 0,2 % a 4 % en peso y de un 50 % a 95 % en peso de polvo de soldadura de alta temperatura, a un material de base de superaleación;

- 50 b) calentamiento simultáneo del material de base y el polvo de relleno de material compuesto por una fuente de calor de soldadura que se puede mover con relación al material de base, a una temperatura que fundirá completamente el polvo de soldadura fuerte y fundirá al menos parcialmente el polvo de soldadura de alta temperatura y también fundirá una capa superficial del material de base, formando así un baño de soldadura;

c) enfriamiento del baño de soldadura a una velocidad suficiente para que, al solidificarse y enfriarse, se forme una

estructura de material compuesto que comprende un entramado interconectado de dendritas columnares de alta temperatura de fusión producidas por el polvo de soldadura de alta temperatura y una matriz eutéctica interdendrítica en el cordón de soldadura mediante el polvo de soldadura fuerte y el polvo de soldadura y el material de base, acompañado de la formación de coalescencia entre un cordón de soldadura y el material de base y

5 d) tratamiento térmico posterior a la soldadura a una temperatura que exceda de la temperatura de sólido del polvo de soldadura fuerte y por debajo de la temperatura de sólido del polvo de soldadura de alta temperatura, que da como resultado al menos una refusión parcial del eutéctico que se adapta a la autorecuperación mediante el relleno de las grietas hasta 0,8 mm de ancho y hasta 20 mm de longitud, en el cordón de soldadura y el material de base por acción capilar, seguido de enfriamiento y consolidación del cordón de soldadura.

10 Preferiblemente, en el que el método de soldadura se aplica a un artículo que consiste en el material de base e incluye además la etapa seleccionada entre: unir artículos, revestir el artículo para restauración dimensional, fabricar el artículo y reparar el artículo.

15 Preferiblemente, en el que el tratamiento por calor posterior a la soldadura se hace a una temperatura por debajo de la temperatura de sólido del polvo de soldadura fuerte, pero por encima de 500 °C, de modo que ocurra al menos un alivio de tensión parcial del cordón de soldadura y el material de base.

Preferiblemente, en el que el tratamiento por calor posterior a la soldadura se hace localmente mediante un calentamiento del cordón de soldadura mediante la fuente de calor de soldadura.

Breve descripción de los dibujos

20 La figura 1 es la micrografía de las secciones transversales (a) y longitudinales (b) de soldaduras con revestimiento BNi-9 Mar M247 - AWS A5.8 producidas en Inconel 738 utilizando soldadura con microplasma después del tratamiento por calor.

La figura 2 es la macroestructura típica de una soldadura revestida por haz láser (LBW) de tres pasadas hecha en Inconel 738 con material de relleno BNi-9 Inconel 738 - AWS A5.8, en donde (a) - muestras longitudinales en el estado soldado, (b) muestras longitudinales tras tratamiento por calor (b).

25 La figura 3 representa la microestructura de la recuperación de las grietas en la ZAC antes de un tratamiento por calor (a) y la macroestructura de la soldadura de revestimiento de tres pasadas después de PWHT a 1200 °C (b).

La figura 4 es la macroestructura del metal de soldadura de revestimiento producido en Inconel 738 usando polvo de relleno BNi-9 Inconel 738 - AWS A5.8 como estado soldado (a) y después del tratamiento por calor (b).

30 La figura 5 representa la macroestructura de la soldadura de revestimiento por láser (a) y ZAC (b) producida en Inconel 738 usando polvo de relleno Inconel 738-AMS4782 después del tratamiento por calor.

La figura 6 es una microestructura de la acumulación de soldadura de revestimiento de múltiples pasadas usando polvo de relleno BNi-9 Mar M247 - AWS A5.8 para una pasada de aplicación de un depósito superficial preliminar y Rene 80 para la pasada superior, en donde (a) - área de fusión entre soldadura con revestimiento BNi-9 y Rene 80 Mar M247 - AWS en la parte superior, (b): zona afectada por calor (ZAC) que representa el área eutéctica.

35 La figura 7 representa una acumulación de soldadura de pasadas múltiples producida usando material de relleno BNi-9 Inconel 738 - AWS A5.8.

La figura 8 es un aspa de turbina reparada con la micrografía que representa el material de base sin defectos (1), la sección reparada del aspa producida por la soldadura de revestimiento de múltiples pasadas (2) y la capa eutéctica (3) en la ZAC que liga las secciones de reparación (2) al material de base (1).

40 Descripción detallada de la invención

Términos y definiciones

Polvo de relleno de material compuesto (material): el material que se agrega al hacer uniones soldadas o soldaduras revestidas comprende una mezcla de polvos de soldadura y soldadura fuerte a alta temperatura distintos con composiciones químicas, rango de solidificación y propiedades diferentes.

45 Polvo de soldadura: el material de soldadura en forma de polvo que se agrega al hacer uniones soldadas o soldaduras revestidas.

Polvo de soldadura de alta temperatura: polvo de soldadura con una temperatura de sólido por encima de 1200 °C y por debajo de la temperatura de fusión del tungsteno de 3422 °C.

50 Polvo de soldadura fuerte: material de soldadura fuerte en forma de polvo que se agrega al hacer uniones soldadas fuerte con una temperatura de fusión por encima de 400 °C, pero por debajo de la temperatura de fusión de un material

de base y polvo de soldadura de alta temperatura.

Material base o metal: metal o aleación del artículo o componente para soldar.

5 Revestimiento: el procedimiento de aplicación de una capa relativamente gruesa (>0,5 mm (0,02 pulg.)) de material de soldadura y/o polvo de soldadura de material compuesto con el fin de mejorar el desgaste y/o la resistencia a la corrosión u otras propiedades y/o restaurar la pieza a las dimensiones requeridas con mínima penetración en el material de base.

Revestimiento de pasadas múltiples: revestimiento con dos o más pasadas consecutivas de material de soldadura y/o polvo de soldadura de material compuesto.

Soldadura por arco de tungsteno con gas = GTAW

10 Soldadura por rayo láser = LBW

Soldadura por haz de electrones = EBW

Soldadura por arco de plasma = PAW

Soldadura de oxcombustible = OAW

Tratamiento por calor posterior a la soldadura = PWHT

15 Baño de soldadura fundida: estado líquido o semilíquido de un baño de soldadura antes de la solidificación como metal de soldadura.

Cordón de soldadura: un depósito de soldadura que resulta de la solidificación de un material de soldadura y/o polvo de soldadura de material compuesto durante la soldadura y/o la pasada de revestimiento.

20 Material de soldadura similar: un material de soldadura que tiene la misma composición química que un material de base.

Material de soldadura distinto: un material de soldadura con una composición química diferente de un material de base.

25 Zona afectada por el calor (ZAC): esa porción del metal de base que no se ha fundido, pero cuyas propiedades mecánicas o microestructura se han visto alteradas por el calor de la soldadura, el revestimiento, la soldadura fuerte o el corte.

Cordón de soldadura homogéneo: un cordón de soldadura que consiste en granos, dendritas y fases similares con composición química, rango de solidificación y propiedades físicas similares.

Cordón de soldadura heterogénea: un cordón de soldadura que consiste en granos, fases y precipitados con diferentes composiciones químicas, rangos de sólidos - líquidos o rangos de solidificación y propiedades físicas.

30 Refusión parcial de un cordón de soldadura: calentar el cordón de soldadura de material compuesto a una temperatura que exceda de la temperatura de solidificación del polvo de soldadura fuerte, pero por debajo de la temperatura de solidificación del polvo de soldadura de alta temperatura.

35 Matriz eutéctica: aleación que se forma durante una interacción metalúrgica del polvo de soldadura fuerte y el polvo de soldadura de alta temperatura a una temperatura que está por debajo de la temperatura del sólido de las dendritas en el cordón de soldadura de material compuesto.

Cordón de soldadura de material compuesto: aleación producida por soldadura o revestimiento que comprende al menos dos constituyentes, que son dendritas y eutécticos, con diferentes propiedades y rango de solidificación.

40 Depresor del punto de fusión: un elemento o elementos químicos que reducen la temperatura de fusión de metales y aleaciones que a veces dan como resultado la formación de eutécticos y un aumento del rango de sólidos y líquidos, también conocido como rango de solidificación.

Temperatura de sólido: la temperatura más alta a la que un metal o una aleación son completamente sólidos.

Temperatura de líquido: la temperatura más baja a la que todo metal o toda aleación son líquidos.

Rango o temperatura de sólido-líquido: la región de temperatura entre sólidos y líquidos en donde el metal o la aleación están en un estado parcialmente sólido y parcialmente líquido.

45 Penetración de la soldadura: la profundidad mínima a la que se extiende una soldadura desde su cara hasta un material de base o unión, sin refuerzo.

Discontinuidad: una interrupción de la estructura típica de un cordón de soldadura (metal), como la falta de homogeneidad en las características mecánicas, metalúrgicas o físicas del material o cordón de soldadura.

5 Defecto de soldadura: una discontinuidad o discontinuidades que, por naturaleza o efecto acumulado (por ejemplo, la longitud total de la grieta), hace que una pieza o un producto no puedan cumplir con los estándares o las especificaciones de aceptación aplicables mínimos.

Grieta: una discontinuidad de tipo fractura que se caracteriza por una punta afilada y una alta proporción de largo a ancho, que generalmente excede de tres (3).

Fisura: una pequeña discontinuidad similar a una grieta con solo una ligera separación (desplazamiento de la abertura) de las superficies de fractura. Los prefijos macro- o micro- indican el tamaño relativo.

10 Baño de soldadura heterogénea: es un baño de soldadura fundida o semifundida en la que coexisten materiales de soldadura fuerte, de soldadura y de base distintos licuados con una distribución no uniforme de elementos químicos antes de la solidificación en un cordón de soldadura heterogénea de material compuesto.

15 Cordón de soldadura heterogénea de material compuesto: un depósito de soldadura que resulta de la solidificación de un baño de soldadura heterogénea que produce al menos dos constituyentes ligados de forma metalúrgica, como en este caso un entramado interconectado de dendritas y una matriz eutéctica interdendrítica, cada una con una composición química, rango de solidificación y propiedades físicas significativamente diferentes.

Temperatura de envejecimiento: es una temperatura a la que ocurre la precipitación de fases secundarias durante el tratamiento por calor de metales y aleaciones de la solución sólida sobresaturada.

20 Pasada de soldadura para aplicación de un depósito superficial preliminar: una preparación de la superficie usando un procedimiento de soldadura por fusión de revestimiento que deposita el metal de la superficie sobre un material de base para proporcionar un depósito de metal de soldadura metalúrgicamente compatible para la posterior terminación de la soldadura.

25 Materiales de base de superaleación: son materiales metálicos que se usan para la fabricación de componentes de motores de turbinas y otros artículos que presentan una excelente resistencia mecánica y a la fluencia (tendencia de los materiales sólidos a moverse o deformarse lentamente bajo tensión) a altas temperaturas, hasta una temperatura de fusión de 0,9; buena estabilidad superficial, resistencia a la oxidación y a la corrosión. Las superaleaciones tienen típicamente una matriz con una estructura austenítica de cristal cúbica centrada en las caras. Las superaleaciones se usan principalmente para la fabricación de componentes de motores de turbina.

30 Estructura de soldadura de material compuesto: la estructura heterogénea comprende un entramado de dendritas interconectadas y una matriz eutéctica ligadas metálicamente a alta temperatura, en donde la ligadura de metales surge de la extensión espacial incrementada de los átomos de valencia de los metales que se juntan durante la fusión y la solidificación de un baño de soldadura.

Artículo fabricado originalmente: un artículo que nunca ha sido objeto de reparación.

DESCRIPCIÓN

35 Las aspas de la turbina de los motores aeronáuticos e industriales están fabricadas con superaleaciones, materiales solidificados direccionalmente y monocristalinos con una baja ductilidad para garantizar altas propiedades de rotura. Sin embargo, la baja ductilidad reduce la soldabilidad de estos materiales debido a las capacidades limitadas de las soldaduras para acomodar las tensiones residuales por deformación plástica.

40 Para realizar una soldadura exitosa en materiales con baja ductilidad es esencial minimizar las tensiones por solidificación reduciendo la temperatura de fusión de los materiales de relleno, minimizando la profundidad de la penetración, sobrecalentando un material de base e incrementando el rango de solidificación de los cordones de soldadura. Esto permite la acomodación de la solidificación y las tensiones térmicas por deformación plástica dentro de los cordones de soldadura.

45 El método inventado aborda el problema del agrietamiento mediante la creación de soldaduras de autorecuperación en las que las grietas en los cordones de soldadura y en la ZAC adyacente a la línea de fusión se autorecuperan durante el tratamiento por calor posterior a la soldadura. Además, la autorecuperación también ocurre durante la soldadura de varias pasadas debido a las entradas de calor de las pasadas posteriores.

El método inventado se describe usando, a modo de ejemplo, solo la reparación de aspas de turbina fabricadas de Inconel 738.

50 Antes de la reparación de la soldadura, las aspas de la turbina, así como otros componentes del motor de la turbina, se someten a un pelado de los recubrimientos protectores, si los hubiera, y a la desincrustación y limpieza de acuerdo con los procedimientos estándar pertinentes de fabricación de equipo original (OEM, en inglés).

ES 2 742 376 T3

Después de la limpieza, las aspas de la turbina se someten a ensayo de tintas fluorescentes penetrantes (FPI, en inglés) según AMS2647 o ASTM DE1417 o los estándares de OEM, seguido de una inspección dimensional.

5 Antes de soldar, las aspas de turbina fabricadas con superaleaciones policristalinas de endurecimiento por precipitación, como Inconel 738, también pueden someterse a un tratamiento por calor de renovación o un tratamiento de alta presión isostática (HIP, en inglés) para restaurar la longevidad a la rotura y a la fatiga de las piezas y mejorar la capacidad de un material de base para tolerar una soldadura.

Por ejemplo, el recocido de renovación (solución) de Inconel 738 tiene lugar a una temperatura de $1190\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un intervalo de 2 a 4 horas, seguido de un enfriamiento de control para reducir la cantidad de fase γ' .

10 Después del tratamiento por calor, el material dañado del área de reparación se elimina mecánicamente mediante mecanizado o pulido manual usando una lima rotativa manual y rebabas de carburo de tungsteno.

El material defectuoso debe eliminarse por completo para garantizar soldaduras sanas. Por lo tanto, después del mecanizado, el área de reparación se somete a FPI para verificar la eliminación completa de grietas y luego se desengrasa con limpieza alcalina, con acetona, con metanol o con vapor.

15 Los polvos de soldadura de material compuesto premezclados pueden incluir polvos de soldadura fuerte a base de un porcentaje desde un 5 % a 50 % de boro, tales como AWS A5.8 BNi-9 (además de AWS BNi-9), AMS 4777 o soldadura fuerte a base de silicio AMS 4782 o polvo de soldadura fuerte a base de silicio-boro Amdry 788 y un polvo de soldadura de alta temperatura. El polvo de soldadura a alta temperatura puede tener una composición química similar a la del material de base o diferente de la composición química del material de base para producir soldaduras más superiores.

20 Los polvos de soldadura de material compuesto comprendían el polvo de soldadura a alta temperatura Inconel 738 o los polvos distintos que tienen una resistencia a la oxidación superior, como Mar M247, Rene 80, Rene 142 o polvos personalizados con polvos de soldadura fuerte se preparan por adelantado o se producen directamente en el alimentador de polvos multioperador estándar durante el revestimiento.

La selección de polvos para soldadura fuerte y soldadura de alta temperatura se basa en la temperatura de servicio, el estado de tensión y deformación del área de reparación y la composición química de un material de base.

25 Por ejemplo, para una reparación de aspas de turbina de baja presión que están expuestas a temperaturas moderadas, los polvos de soldadura fuerte a base de boro son la mejor opción. Esto se debe a la capacidad del boro para difundirse fácilmente en la ZAC, que produce eutécticos que recuperan las microgrietas adyacentes a la zona de fusión mediante la formación de eutécticos que tienen temperaturas de fusión menores que las del material original. Estos eutécticos ligan metalúrgicamente las soldaduras al material original creando una estructura única mostrada en la fig. 3, b.

30 Para aspas de turbina relativamente ligeras de motores aeronáuticos que están expuestos a condiciones de calor y condiciones extremas, los polvos de soldadura fuerte a base de silicio, como AMS 4782 y otros, son más preferibles porque tienen mejor resistencia a la oxidación que los materiales de soldadura fuerte a base de boro.

35 Las aspas de turbina de alta presión de los motores industriales pesados que están expuestas a altas temperaturas y tensiones pueden repararse usando AWS BNi-10, BCo-1 o polvos de soldadura fuerte similares, a base de silicio y boro.

La misma propuesta se podría usar para seleccionar polvos de soldadura de alta temperatura que puedan producirse a partir de superaleaciones a base de hierro, a base de níquel o a base de cobalto, similares o distintas.

40 Durante el revestimiento, los polvos de soldadura y de soldadura fuerte a alta temperatura, así como el material de base, podrían fundirse mediante numerosas fuentes de calor o de soldadura, como láser o haz de electrones, arco y plasma.

Las soldaduras por láser y microplasma son actualmente los procedimientos más avanzados para la restauración de la punta de las palas de turbina. Por lo tanto, estos procedimientos de soldadura se discuten con más detalle. La entrada de calor durante la soldadura se minimiza, mientras que la velocidad de soldadura se maximiza para reducir la profundidad de penetración, la dilución, el tamaño del baño de soldadura y el tiempo de solidificación.

45 La solidificación y el enfriamiento del baño de soldadura producido usando parámetros de soldadura optimizados da como resultado la formación de cordones de soldadura heterogénea de material compuesto que comprenden un entramado interconectado continuo de dendritas producidas por el polvo de soldadura de alta temperatura y los eutécticos interdendríticos formados por los polvos de soldadura fuerte y de soldadura y el material de base.

50 Por experimento, se encontró que las condiciones óptimas para la formación de cordones de soldadura heterogénea de material compuesto se lograron en el revestimiento con láser con una proporción de la longitud del baño de soldadura a la velocidad de soldadura de 0,002 a 0,02.

La fusión del sustrato por rayo láser con la introducción en el baño de soldadura de polvo de soldadura de material compuesto dio como resultado la fusión de todos los materiales y la formación de una ligadura metálica entre las

soldaduras revestidas y el material de base. La composición química de la primera capa depende de la dilución y la profundidad de penetración.

5 Una estructura dendrítica columnar con crecimiento epitaxial de dendritas perpendicular al sustrato se forma a lo largo de la zona de fusión durante la solidificación del baño de soldadura. Con el progreso de la solidificación, la dirección de crecimiento de las dendritas inclinadas en la dirección de la soldadura da como resultado la formación de granos equiaxiales o prolongados orientados paralelamente al sustrato en la sección de la parte de arriba de las soldaduras revestidas. Sin embargo, en el revestimiento de múltiples pasadas, las secciones de la parte de arriba de las soldaduras se volvieron a fundir, lo que dio como resultado la formación del entramado interconectado de dendritas en todas las soldaduras revestidas a partir del material de base como se muestra en la fig. 5. Esta microestructura se formó siempre que se usaron parámetros de soldadura óptimos.

15 La velocidad de soldadura y la velocidad de solidificación altas, la entrada de calor baja, la pequeña longitud del baño de soldadura y la agitación limitada de un metal líquido crearon condiciones de no equilibrio para la solidificación. Esto da como resultado la formación de cordones de soldadura heterogénea de material compuesto en donde los eutécticos ricos en boro y silicio se segregan a lo largo de las dendritas y los límites de los granos, creando una matriz que tiene una capacidad superior para autorrecuperar grietas.

Durante la soldadura también se observó la recuperación de microgrietas en la ZAC con la matriz a base de soldadura fuerte líquida. Sin embargo, debido a la solidificación y al enfriamiento rápidos del baño de soldadura, las grietas grandes adyacentes a la línea de fusión no se recuperaron completamente.

20 Para recuperar completamente toda la soldadura y las grietas de la ZAC, las aspas de la turbina se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura (PWHT) a una temperatura que excedía de la temperatura de solidificación de un polvo de soldadura fuerte, pero que estaba por debajo de la temperatura de solidificación del polvo de soldadura de alta temperatura, lo que dio como resultado la refusión parcial de solo la matriz de base de soldadura fuerte mientras que la geometría de las soldaduras revestidas de material compuesto fue soportada por el entramado continuo de dendritas de alta temperatura.

25 De acuerdo con otra realización preferible, la primera fase del PWHT se hace dentro del rango sólido-líquido de las soldaduras que se puede determinar por el análisis de difusión térmica (DTA, en inglés) de las soldaduras por adelantado o por series de experimentos.

30 Para evitar la formación de huecos durante el PWHT, la matriz a base de soldadura fuerte tiene que interconectarse a lo largo de toda la soldadura. Por lo tanto, una selección de los polvos de soldadura y soldadura fuerte adecuados y la optimización de los parámetros de soldadura desempeñaron una función fundamental en la autorrecuperación de las grietas.

Se encontró que el procedimiento inventado puede usarse para una recuperación de las grietas de hasta 0,8 mm de ancho y hasta 20 mm de longitud, que no se ha observado en ninguna de las técnicas anteriores.

35 El tiempo de remojo prolongado permitió la difusión de boro y, hasta cierto punto silicio, en el material de base. La difusión de boro también se observó en las dendritas producidas por el polvo de soldadura a alta temperatura, lo que dio como resultado la formación de eutécticos en la ZAC de Inconel 738 que se acompañó de recuperación de las grietas. Observamos la eliminación de todas las evidencias de agrietamiento original a una profundidad de hasta 1,8 mm, como se muestra en la fig. 3, b.

40 Se han hecho varias reparaciones de soldadura de aspas de turbina de componentes de motores de turbinas industriales y aeronáuticos, así como las paletas de guía de boquillas (NGV, en inglés) usando materiales de soldadura distintos. Por lo tanto, el propósito principal del PWHT es restaurar las propiedades mecánicas originales del material de base y realizar el alivio de tensión maximizando las propiedades mecánicas de las soldaduras.

45 Para completar la autorrecuperación de las grietas después de la soldadura, las aleaciones Inconel 738 se trataron por calor a una temperatura en el intervalo de 1120 °C a 1220 °C durante dos horas, seguido de un enfriamiento rápido con argón desde una temperatura de 980 °C. Esto dio como resultado el recocido del material de base, la disolución de gamma prima y la reprecipitación de carburos.

Para restaurar las propiedades mecánicas originales del material de base de Inconel 738, se hizo un PWHT de dos fases a una temperatura de 1120 °C durante cuatro (4) horas, seguido de un envejecimiento a una temperatura de 845 °C durante dieciséis (16) horas y enfriamiento rápido con argón.

50 Se observó que la microestructura típica de IN 738 después del envejecimiento en dos fases comprendía la precipitación cuboidal de gamma prima en la matriz austenítica. El endurecimiento por precipitación con gamma prima y carburos aseguró una resistencia final y un límite elástico altos de 49,4 KSI y 36,8 KS, respectivamente, con un alargamiento del 15,5 % y una resistencia a la fluencia con un tiempo de rotura de 23,7 horas a tensiones de 22 KSI y una temperatura de 982 °C. La mayoría de los límites de grano después de este tratamiento por calor ha tenido una morfología dentada que contribuye a una longevidad prolongada a la rotura de las aspas.

55

La soldadura producida usando los polvos de soldadura de material compuesto inventados comprendía un entramado interconectado de dendritas de alta temperatura de fusión y una matriz eutéctica a base de níquel y cobalto interdendrítica enriquecida con boro (serie B), silicio (serie S) y boro y silicio (serie SB) que fueron sometidos a un envejecimiento parcial durante el PWHT también.

- 5 Como resultado, las soldaduras hechas con polvo de soldadura fuerte a base de boro presentaron características de los límites de los granos más gruesos y una microestructura gamma prima esférica y cuboidal muy fina que también era típica para Inconel 738 en el estado envejecido.

- 10 Las soldaduras con aditivos de silicio tenían una estabilidad térmica mucho mayor. No se encontraron evidencias de recrystalización de granos austeníticos primarios ni cambios en la morfología de las dendritas. Después del envejecimiento en dos fases, los cordones de soldadura producidos usando polvos de soldadura fuerte a base de Si tenían una fase gamma prima cuboidal extremadamente fina.

Las soldaduras con una cantidad moderada de boro y silicio tenían una microestructura de transición. No se encontraron evidencias de agrietamiento ni en las soldaduras ni en la ZAC.

- 15 Los tres tipos descritos de polvos de soldadura fuerte podrían usarse potencialmente para soldar aspas de turbina Inconel 738, pero las soldaduras producidas usando Si tenían la mayor resistencia a la oxidación como se muestra en la tabla 2, ejemplo 9. Por lo tanto, los polvos de soldadura fuerte a base de Si son más efectivos para la restauración de la punta de las aspas de la turbina, mientras que los polvos de soldadura fuerte a base de boro deben usarse para la reparación de soldadura de grietas en la plataforma del aspa.

- 20 Después de PWHT, el área de reparación se somete a mecanizado o pulido para restaurar el contorno original de las aspas de la turbina.

El FPI final y/o la inspección radiográfica (rayos X) se hacen de acuerdo con los estándares y las especificaciones pertinentes.

El dibujo típico del aspa de turbina que se reparó usando el método inventado y el polvo de relleno de material compuesto se muestra en la fig. 8.

- 25 Esta aspa comprendía la sección original sin defectos del material de base (1), en este caso Inconel 738, y la sección reparada (2) que fue producida por un revestimiento láser de múltiples pasadas y PWHT.

Como resultado, la sección reparada del aspa incluye un entramado dendrítico interconectado producido por el polvo de soldadura de alta temperatura y la matriz a base de soldadura fuerte que produjo coalescencia con el material de base a través de la capa (3) eutéctica sin grietas en la ZAC.

- 30 Para demostrar las capacidades del método inventado y los polvos de soldadura de material compuesto para la reparación de componentes de motores, se hizo un revestimiento de múltiples pasadas en materiales de base de Inconel 738, Mar M002, Inconel 625, Rene N5 y acero inoxidable austenítico 304.

El revestimiento automático de rayo láser se hizo usando un sistema de soldadura láser Liburdi LAWS 1000 equipado con el láser de 1 kW.

- 35 La soldadura automática de microplasma (MPW) se hizo usando un sistema Liburdi LAWS 4000. La soldadura manual GTAW-MA se hizo usando una fuente de alimentación Liburdi PulsWeld 100 y un soplete de soldadura estándar. Los resultados de los experimentos se discuten a continuación en los ejemplos 1 a 9.

Ejemplo 1

- 40 El revestimiento pulsado automático de microplasma de tres (3) pasadas se hizo a temperatura normal usando un material de relleno que comprende un 70 % de relleno de alta temperatura Mar M247 y un 30 % de polvos de soldadura fuerte AWS BNi-9 en el sustrato Inconel 738 de 0,060 a 0,070 pulgadas de ancho.

Se usaron los siguientes parámetros a continuación:

Velocidad de desplazamiento (soldadura): 5,08 cm/min (2 ppm = pulgadas por minuto)

Velocidad de alimentación del polvo - 3 g/min

- 45 Corriente máxima de soldadura - 21,8 A

Corriente de soldadura mínima - 15,6 A

Ciclo de trabajo - 60 %

Frecuencia - 3 Hz

Gas de protección - argón

Arco piloto de gas - argón

5 Las muestras soldadas se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión menor que $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1120 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas se encontraba en un estado sólido-líquido que permitía la autorecuperación de las microgrietas en las soldaduras revestidas y la formación de aleaciones eutécticas a lo largo de la línea de fusión, lo que daba como resultado la recuperación de las microgrietas.

No se observaron grietas en soldaduras revestidas y ZAC. Las micrografías típicas de muestras se muestran en la fig. 1a y 1b.

10 Ejemplo 2

Se hicieron tres (3) pasadas de revestimiento láser a temperatura normal usando un material de relleno que comprende un 75 % de relleno de alta temperatura Inconel 738 y un 25 % de polvo de soldadura fuerte AWS BNi-9 en el sustrato Inconel 738 con un ancho entre 0,2032 cm y 0,2286 cm (entre 0,080 pulgada y 0,090 pulgada) a temperatura normal.

15 Para producir soldaduras revestidas con un ancho entre 0,2286 cm y 0,2540 cm (entre 0,090 y 0,100 pulgadas), el cabezal de soldadura láser osciló perpendicular a la dirección de la soldadura.

Para minimizar el sobrecalentamiento del sustrato durante la primera pasada y garantizar una buena fusión entre las pasadas, la potencia del rayo láser se incrementó de manera incremental desde la primera pasada hasta la más alta (última).

Se usaron los siguientes parámetros de soldadura a continuación:

20 Velocidad de soldadura - 9,65 cm/min (3,8 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 6 g/min

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

Distancia de oscilación: 0,084 cm (0,033 pulgadas) a cada lado de la línea central de la muestra

Potencia de haz: 325 W (primera pasada), 350 W (segunda pasada), 400 W (tercera pasada)

25 Gas portador - argón

Gas de protección - argón

Después de soldar las muestras se cortaron en dos partes iguales.

30 Una parte se sometió a una evaluación metalográfica en estado soldado. Observamos que la autorecuperación de las microgrietas en la ZAC durante la soldadura con láser mediante material de relleno fundido que fue aspirado desde el charco de soldadura por la acción capilar en las grietas se muestra en la fig. 3 a. La segunda parte de la muestra se sometió a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,3 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas estaba en un estado sólido-líquido que permitía la autorecuperación de las microgrietas en las soldaduras. Observamos la formación de la aleación eutéctica a lo largo de la línea de fusión que eliminó todas las evidencias del microgrietamiento de la ZAC original como se muestra en la fig. 3 b.

35 El tratamiento por calor posterior a la soldadura dio como resultado también una descomposición de la solución sólida sobresaturada, la precipitación de partículas ricas en boro como se muestra en la fig. 4 y la reducción de la microdureza de las soldaduras revestidas a un nivel del material original, como se muestra en la tabla 1 a continuación, que confirmó la viabilidad de usar los métodos inventados para reparar componentes de motores estructurales:

40 Tabla 1 - Microdureza de soldaduras revestidas

Material	En estado "como soldado", HV	Después del tratamiento por calor, HV
Material original	427	419
ZAC	425	418
Zona de difusión	N/A	433
Pasada de soldadura de revestimiento 1	554	445

ES 2 742 376 T3

Pasada de soldadura de revestimiento 2	581	481
Pasada de soldadura de revestimiento 3	573	407

Ejemplo 3

5 Se hicieron tres (3) pasadas de revestimiento láser a temperatura normal usando un polvo de relleno que comprendía un 73 % de relleno de alta temperatura Inconel 738 y un 27 % de polvo de soldadura fuerte AWS BNi-9 sobre el sustrato Mar 002 con un ancho entre 0,2032 cm y 0,2286 cm (entre 0,080 pulgada y 0,090 pulgada).

Para producir soldaduras revestidas con un ancho entre 0,2286cm y 0,2540 cm (entre 0,090 pulgada y 0,100 pulgada), la cabeza del láser oscilaba perpendicularmente a la dirección de la soldadura.

Se usaron los siguientes parámetros de soldadura:

Velocidad de soldadura - 9,65 cm/min (3,8 ppm)

10 Velocidad de alimentación del polvo - 8 g/min

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

Distancia de oscilación: 0,084 cm (0,033 pulgada) a cada lado de la línea central de la muestra

Potencia de haz: 475 W para las tres pasadas

Gas portador - argón

15 Gas de protección - argón

20 Las muestras soldadas se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1120 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas estaba en un estado sólido-líquido que permitía la autorecuperación de las microgrietas en las soldaduras. Observamos la formación de la aleación eutectoide a lo largo de la línea de fusión y la recuperación de las microgrietas en la ZAC, como lo confirmó el FPI y la evaluación metalográfica.

Inconel 738: el material de relleno AWS BNi-9 combina una resistencia a la oxidación aceptable y altas propiedades mecánicas debido a la capacidad del exceso de boro para difundirse en el material original. Por lo tanto, este material es el más adecuado para la reparación de componentes estructurales, como carcasas, paletas de guía de boquillas (NGV) y aspas de turbinas de motores industriales con base en tierra.

25 Ejemplo 4

Se hizo un revestimiento láser de tres (3) pasadas a temperatura normal usando un polvo de relleno que comprendía un 75 % de relleno de alta temperatura Inconel 738 y un 25 % de polvo de soldadura fuerte a base de silicio AMS 4782 sobre el sustrato Inconel 738 con un ancho entre 0,203 cm y 0,229 cm (entre 0,080 pulgada y 0,090 pulgada).

30 Para producir soldaduras revestidas con un ancho entre 0,254 cm y 0,305 cm (entre 0,100 pulgada y 0,120 pulgada), el cabezal de soldadura láser osciló perpendicular a la dirección de la soldadura.

Se usaron los siguientes parámetros de soldadura a continuación:

Velocidad de soldadura - 9,65 cm/min (3,8 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 8 g/min

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

35 Distancia de oscilación: 0,084 cm (0,033 pulgada) a cada lado de la línea central de la muestra

Potencia de haz: 475 W para todas las pasadas

Gas portador - argón

Gas de protección - argón

40 Las muestras soldadas se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1120 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas estaba en estado sólido-líquido produciendo la recuperación de las microgrietas.

ES 2 742 376 T3

El FPI y la evaluación metalográfica confirmaron que las muestras no presentaban grietas. Una micrografía típica de una muestra se muestra en la fig. 5.

- 5 El silicio aumenta significativamente las resistencias a la oxidación de las soldaduras revestidas en comparación con el material original y los materiales de soldadura fuerte a base de boro. La composición de Inconel 738 - AMS4782 es más prominente para una restauración de punta relativamente poco profunda de aspas de aeroturbinas.

Ejemplo 5

La evaluación de las soldaduras revestidas producidas usando un 50 % de relleno Mar M247 y un 50 % de polvo de soldadura fuerte AMS4782 se hizo para la reparación de grietas axiales y la restauración de la punta de las aspas de turbinas fabricadas con aleaciones policristalinas y monocristalinas estándar.

- 10 Se hizo un revestimiento láser de tres (3) pasadas sobre un sustrato Inconel 738 con un ancho entre 0,203 cm y 0,229 cm (entre 0,080 pulgada y 0,090 pulgada) a temperatura normal.

Para producir una soldadura con un ancho entre 0,254 cm y 0,305 cm (entre 0,100 pulgada y 0,120 pulgada) el cabezal de soldadura láser osciló a través de la muestra.

Se usaron los siguientes parámetros de soldadura a continuación:

- 15 Velocidad de soldadura - 9,65 cm / min (3,8 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 6 g/min.

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

Distancia de oscilación: 0,084 cm (0,033 pulgada) a cada lado de la línea central de la muestra.

Potencia del haz: 475 W para las tres pasadas

- 20 Gas portador - argón

Gas de protección - argón

Diámetro de fibra - 800 µm

Diámetro del polvo de relleno - de 45 µm a 75 µm

- 25 Las muestras soldadas se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1220 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas.

La evaluación metalográfica confirmó que las muestras habían cumplido con los estándares de aceptación relevantes.

Ejemplo 6

- 30 Para realizar una evaluación de la resistencia al agrietamiento de las soldaduras revestidas con una cantidad mínima de polvo de soldadura fuerte, la soldadura revestida con láser se hizo a una temperatura normal en el sustrato Mar M 002 usando un polvo de soldadura de alta temperatura Rene 142 al 95 % y un polvo de soldadura fuerte AWS BNi-9 para simular la reparación de aspas solidificadas direccionalmente y monocristalinas y NGV.

El ancho de las muestras varió de 0,203 cm a 0,254 cm (de 0,080 pulgada a 0,100 pulgada).

Para producir soldaduras revestidas con un ancho de 0,203 cm a 0,254 cm (de 0,080 pulgada a 0,100 pulgada), el cabezal de soldadura láser oscilaba perpendicularmente a una dirección de soldadura.

- 35 Se usaron los siguientes parámetros de soldadura a continuación:

Velocidad de soldadura - 9,65 cm/min (3,8 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 8 g/min.

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

Distancia de oscilación: 0,102 cm (0,040 pulgada) a cada lado de la línea central de la muestra.

- 40 Potencia del haz: 475 W para las tres pasadas

Gas portador - argón

Gas protector - argón

ES 2 742 376 T3

Las muestras soldadas se sometieron a un alivio de la tensión posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $885 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas estaba en un estado sólido.

La evaluación de la microestructura no reveló ninguna indicación que excediera los límites aceptables relevantes.

5 Ejemplo 7

Para simular una reparación extensa de la carcasa y otros componentes estructurales fabricados con la superaleación Inconel 625 a temperatura normal, se hizo el revestimiento láser de múltiples pasadas con una altura de 1,905 cm a 2,8 cm (de 0,750 pulgada a 1,1 pulgada) usando el material de relleno que comprendía un 75 % de Inconel 738 y un 25 % de polvo AWS BNi-9 usando los siguientes parámetros:

10 Velocidad de soldadura - 9,65 cm/min (3,8 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 8 g/min

Velocidad de oscilación (a través de muestras de soldadura) - 114,3 cm/min (45 ppm)

Distancia de oscilación: 0,102 cm (0,040 pulgada) a cada lado de la línea central de la muestra

Potencia de haz: 475 W para las tres pasadas

15 Gas portador - argón

Gas de protección - argón

20 Para reducir las tensiones residuales y evitar el agrietamiento, después de la acumulación de la soldadura con una altura de 0,635 cm a 1,270 cm (de 0,250 pulgada a 0,500 pulgada), las muestras se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1200 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura, el material de las soldaduras revestidas estaba en un estado sólido-líquido que permitía la autorecuperación de las microgrietas en las soldaduras revestidas. Observamos la formación de una capa de difusión y la recristalización de un material original a lo largo de la línea de fusión y el alivio de la tensión.

25 Después del tratamiento por calor, el procedimiento de revestimiento con láser continuó usando los mismos parámetros de soldadura hasta alcanzar la acumulación de soldadura requerida, seguido de otro ciclo de tratamiento por calor a una temperatura de $1200 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas.

Después del segundo ciclo de tratamiento por calor, la acumulación de soldadura se mantuvo prácticamente en la misma geometría con una reducción menor en el espesor menor que un 5 %.

30 No se encontraron grietas en las soldaduras revestidas y en la ZAC. Las muestras con soldaduras de revestimiento se muestran en la fig. 7.

Ejemplo 8

El revestimiento automático de microplasma pulsado de tres (3) pasadas se hizo usando material de relleno que comprendía polvo de soldadura fuerte en un 70 % de Inconel 738 y un 30 % de AWS BCo-1 sobre sustrato Inconel 738 con un ancho de 0,152 cm a 0,178 cm (de 0,060 pulgada a 0,070 pulgada) a temperatura normal.

35 Se usaron los siguientes parámetros a continuación:

Velocidad de soldadura - 5,04 cm/min (2 ppm)

Velocidad de alimentación del polvo - 2,6 g/min

Corriente máxima de soldadura - 22 A

Corriente de soldadura mínima - 15 A

40 Ciclo de trabajo - 60 %

Frecuencia - 3 Hz

Gas de protección - Ar al 95 % - H₂ al 5 %

Arco piloto de gas - argón

45 Las muestras soldadas se sometieron a un tratamiento por calor posterior a la soldadura al vacío con una presión por debajo de $1,33 \times 10^{-2}$ Pa (10^{-4} torr) a una temperatura de $1220 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas. A esta temperatura,

el material de las soldaduras revestidas estaba en un estado sólido-líquido que permitía la autorecuperación de las microgrietas en las soldaduras revestidas. Observamos la formación de una capa de difusión y la recristalización de un material original a lo largo de la línea de fusión y la recuperación de las microgrietas. No se encontraron grietas en las soldaduras revestidas ni en la ZAC.

5 Ejemplo 9

Para evaluar las propiedades mecánicas de las soldaduras revestidas con láser de múltiples pasadas producidas en el material de la base de sacrificio, que se eliminó por completo y se desechó después de la soldadura, se usaron los siguientes polvos:

Polvo de soldadura de alta temperatura que consistía en un % en peso de los siguientes elementos químicos:

- 10 Co de 9 % a 15 %;
 Al de 3 % a 6,5 %;
 C de 0,1 % a 0,2 %;
 Ti, Zr y Hf con un contenido total en el intervalo de 1 % a 8,5 %;
 Ta y Nb con un contenido total en el intervalo de 0,5 % a 8,5 %;
 15 W y Mo con un contenido total en el intervalo de 7 % a 20 %;
 Cr y Re con un contenido total en el intervalo de 6,5 % a 18,5 %;
 Fe y Mn con un contenido total en el intervalo de 0,1 % a 1 %;
 Ni e impurezas para el equilibrio.

Composiciones de soldadura fuerte:

- 20 La composición 1 del polvo de soldadura fuerte a base de boro (más de soldadura fuerte 1) comprendía (% en peso):
 Ni - 20 % Co - 20 % Cr - 3 % Ta - 3 % B - 0,1 La

La composición 2 del polvo de soldadura fuerte a base de silicio (más de soldadura fuerte 2) comprendía (en % peso):
 Ni - 19 % Cr - 10 % Si

- 25 La composición 3 de polvo de soldadura fuerte que contiene boro y silicio (más de soldadura fuerte 3) comprende (% en peso):

Co - 22 % Cr - 21 % Ni - 14 % W - 2 % B - 2 % Si - 0,03 % La

El contenido del material de soldadura fuerte varió de un 5 % a 50 % como se muestra en la tabla 2.

Para producir una acumulación de soldadura de 12,7 cm x 5 cm x 0,305 cm (5 pulgada x 2 pulgada x 0,120 pulgada) se usó un revestimiento láser de tamaño.

- 30 El PWHT de las soldaduras se hizo en un vacío de $6,6 \times 10^{-3}$ Pa ($0,5 \times 10^{-4}$ torr) a una temperatura de $1205 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ seguido de un tratamiento por calor de envejecimiento de dos fases a una temperatura de $1120 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ durante dos (2) horas 845 °C durante dieciséis (16) horas y enfriamiento rápido con argón para comparar las propiedades mecánicas de las soldaduras con el material de base Inconel 738.

La prueba de tracción de las soldaduras se hizo a una temperatura de 982 °C según ASTM E21.

- 35 La prueba de oxidación cíclica acelerada se hizo en aire a una temperatura máxima de 1100 °C , seguido de enfriamiento por aire a temperatura normal.

- 40 De acuerdo con la tabla 2, las soldaduras producidas usando polvo de soldadura fuerte a base de boro con la composición 1 demostraron propiedades mecánicas superiores y una ductilidad excepcional que excedieron de las propiedades mecánicas de Inconel 738 y los materiales de soldadura estándar Inconel 625 y Haynes 230 que se habían usado para reparar las aspas de turbina a una temperatura de 980 °C . Sin embargo, los aditivos de boro reducían la resistencia a la oxidación a una temperatura de 1100 °C como se muestra en la tabla 3.

Las propiedades mecánicas de las soldaduras producidas con polvo de soldadura fuerte a base de silicio con la composición 2 tuvieron una resistencia a la oxidación superior que excedió de la resistencia a la oxidación de las soldaduras Rene 80 y Rene 142 y propiedades mecánicas moderadas.

- 45 Las soldaduras producidas usando polvo de soldadura fuerte que contenía B y Si con la composición 3 tenían

ES 2 742 376 T3

propiedades mecánicas que estaban entre las de las soldaduras que comprendían únicamente B y Si.

Tabla 2 - Propiedades mecánicas de las soldaduras con revestimiento láser en comparación con las propiedades de Inconel 738 y algunas superaleaciones estándar a una temperatura de 982 °C

Material	UTS, KSI (kPa)	Alargamiento, %
Soldadura de revestimiento		
WP + 25 % de la composición de soldadura fuerte 1	64,8 (447)	19,5
WP + 15 % de la composición de soldadura fuerte 1	60,8 (419)	16
WP + 10 % de la composición de soldadura fuerte 1	67,1 (463)	18,4
WP + 5 % de la composición de soldadura fuerte 1	63,3 (436)	12,4
WP + 35 % de la composición de soldadura fuerte 2	35,3 (243)	15,1
WP + 50 % de la composición de soldadura fuerte 3	44 (303)	18,8
Superalesiones estándar y materiales de soldadura		
Inconel 738	49,4 (341)	15,5
Haynes 230	29,4 (203)	24,8
Inconel 625	24,1 (166)	45,9

5

Tabla 3 - Resistencia a la oxidación cíclica de soldaduras e Inconel 738

Materiales	WP + 25 % de la composición de soldadura fuerte 1	WP + 35 % de la composición de soldadura fuerte 2	WP + 50 % de la composición de soldadura fuerte 3	IN748 (mater. de base)	René 80 (mater. de base)	Rene 142 (mater. de base)
Cambio de peso, g/cm ³	-0,1338	-0,0025	-0,2249	-0,0426	-0,0936	-0,0178

10

Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, los polvos de soldadura fuerte a base de boro deberían usarse preferiblemente para la reparación de soldadura y la fabricación de componentes de motores estructurales que ejercen altas tensiones durante el servicio y tengan aluminización protectora o recubrimientos de aluminización de platino. Los polvos para soldadura fuerte a base de silicio deberían usarse preferiblemente para la restauración de la punta de las aspas de turbina donde la alta resistencia a la oxidación y la ductilidad de las soldaduras es mucho más crítica que las propiedades de rotura.

REIVINDICACIONES

1. Un método de revestimiento y soldadura por fusión de superaleaciones comprende las etapas de:
 - a. aplicar un polvo de relleno de material compuesto que comprende entre un 5 % y 50 % en peso de polvo de soldadura fuerte que incluye depresores de punto de fusión que incluyen boro en la cantidad que varía de un 0,2 % a 4 % en peso y de un 50 % a 95 % en peso de polvo de soldadura de alta temperatura, a un material de base de superaleación;
 - b. calentar simultáneamente el material de base y el polvo de relleno de material compuesto por una fuente de calor de soldadura que se puede mover en relación con el material de base, a una temperatura que funde completamente el polvo de soldadura fuerte y funde al menos parcialmente el polvo de soldadura de alta temperatura y también funde una capa superficial del material de base, formando así un baño de soldadura;
 - c. enfriar el baño de soldadura de manera que al solidificarse y enfriarse se forme un cordón de soldadura heterogéneo que es una estructura de material compuesto que comprende un entramado interconectado de dendritas columnares de alta temperatura de fusión producidas por el polvo de soldadura de alta temperatura y se forme una matriz eutéctica interdendrítica en el cordón de soldadura por el polvo de soldadura fuerte y el polvo de soldadura y el material de base y
 - d. tratar por calor posterior a la soldadura a una temperatura que excede de la temperatura de sólido del polvo de soldadura fuerte y está por debajo de la temperatura de sólido del polvo de soldadura de alta temperatura, que da como resultado al menos una refusión parcial del eutéctico que se adapta a la autorecuperación mediante el relleno de grietas hasta un ancho de 0,8 mm y hasta una longitud de 20 mm, en el cordón de soldadura y el material de base por acción capilar, seguido de enfriamiento y consolidación del cordón de soldadura.
2. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que la relación entre la longitud del baño de soldadura en mm y la velocidad de soldadura en mm/min se selecciona para que se encuentre entre 0,002 y 0,02.
3. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el polvo de soldadura fuerte se funde completamente mientras que el polvo de soldadura a alta temperatura se calienta a una temperatura por debajo de su temperatura de líquido.
4. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el polvo de relleno de material compuesto se calienta durante la soldadura por la fuente de calor a una temperatura que excede de la temperatura de fusión del polvo de soldadura fuerte, pero está por debajo de 1,2 veces la temperatura de fusión del polvo de soldadura a alta temperatura.
5. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 3, en el que el polvo de relleno de material compuesto se calienta durante la soldadura por la fuente de calor a una temperatura que excede de la temperatura de fusión del polvo de soldadura fuerte, pero está por debajo de 1,2 veces la temperatura de fusión del polvo de soldadura a alta temperatura.
6. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el polvo de soldadura de alta temperatura consiste en % en peso de los siguientes elementos químicos:
 - Co de 9 % a 15 %;
 - Al de 3 % a 6,5 %;
 - C de 0,1 % a 0,2 %;
 - Ti, Zr y Hf con un contenido total en el intervalo de un 1 % a 8,5 %;
 - Ta y Nb con un contenido total en el intervalo de un 0,5 % a 8,5 %; W y Mo con un contenido total en el intervalo de un 7 % a 20 %;
 - Cr y Re con un contenido total en el intervalo de un 6,5 % a 18,5 %;
 - Fe y Mn con un contenido total en el intervalo de un 0,1 % a 1 %;
 - Ni e impurezas para el equilibrio.
7. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el tratamiento por calor posterior a la soldadura incluye una segunda etapa adicional de una temperatura de calor de envejecimiento del material de base.
8. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el depresor del punto de fusión en el polvo de soldadura fuerte consiste además en Si en una cantidad que varía de un 1 a 10 % en peso del polvo de

soldadura fuerte.

9. Método de revestimiento y soldadura por fusión según la reivindicación 1, en el que el depresor del punto de fusión en el polvo de soldadura fuerte consiste en una mezcla B y Si preseleccionada en una cantidad que varía de un 1,2 % a 10 % en peso del polvo de soldadura fuerte, en donde el contenido de B permanece menor que un 4 % en peso.

5

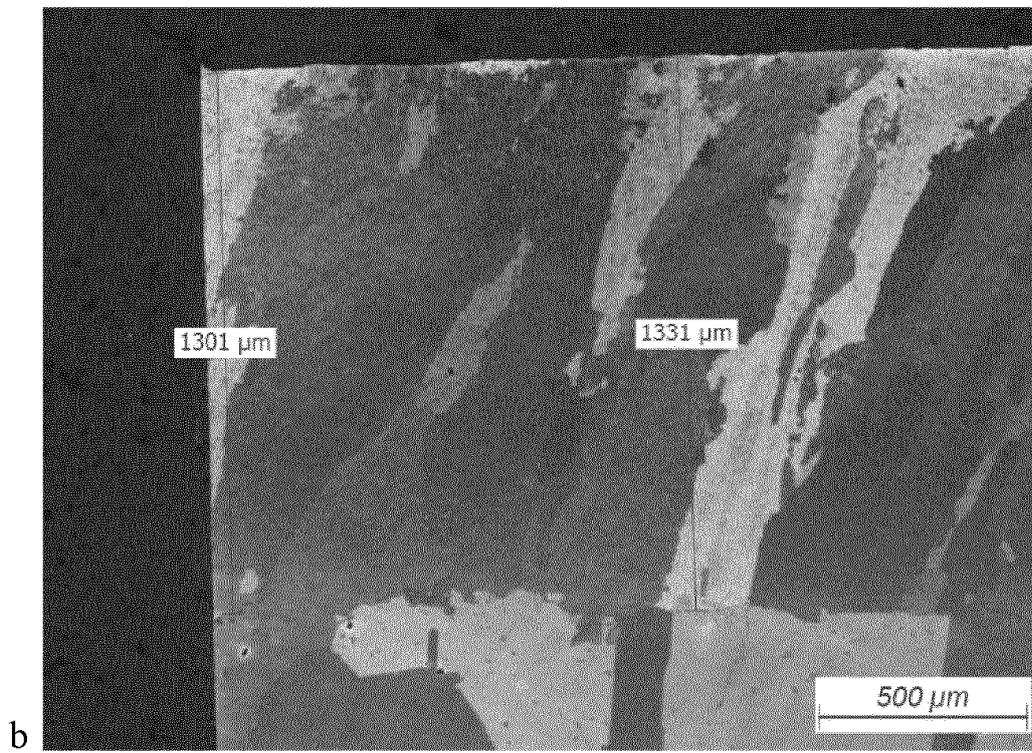
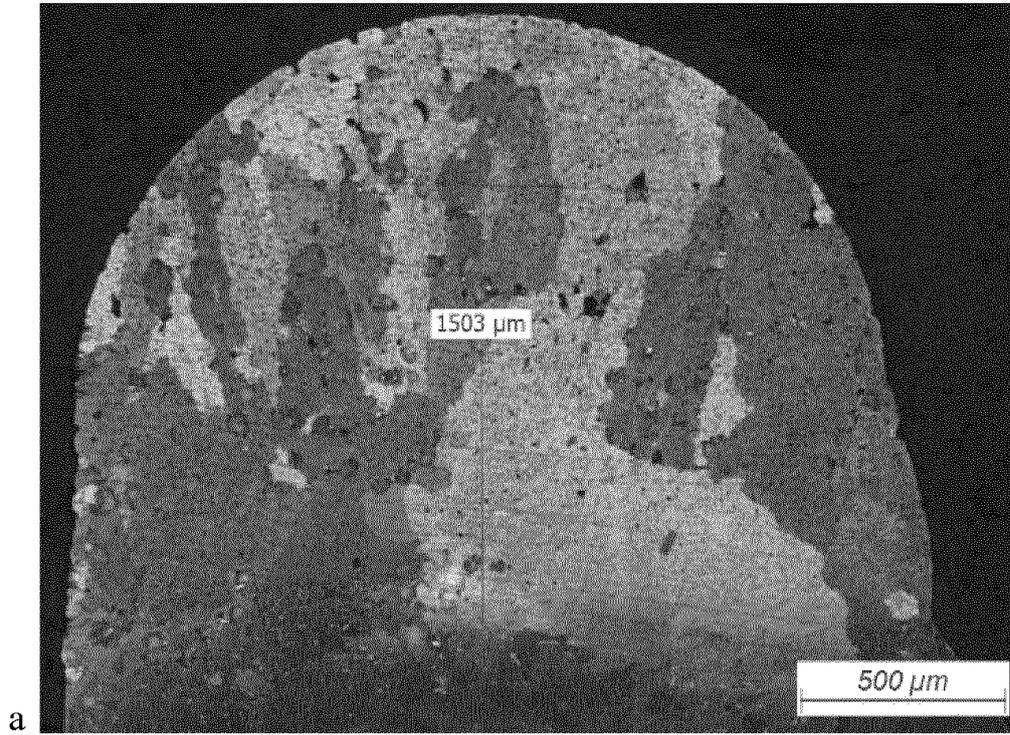


FIGURA 1

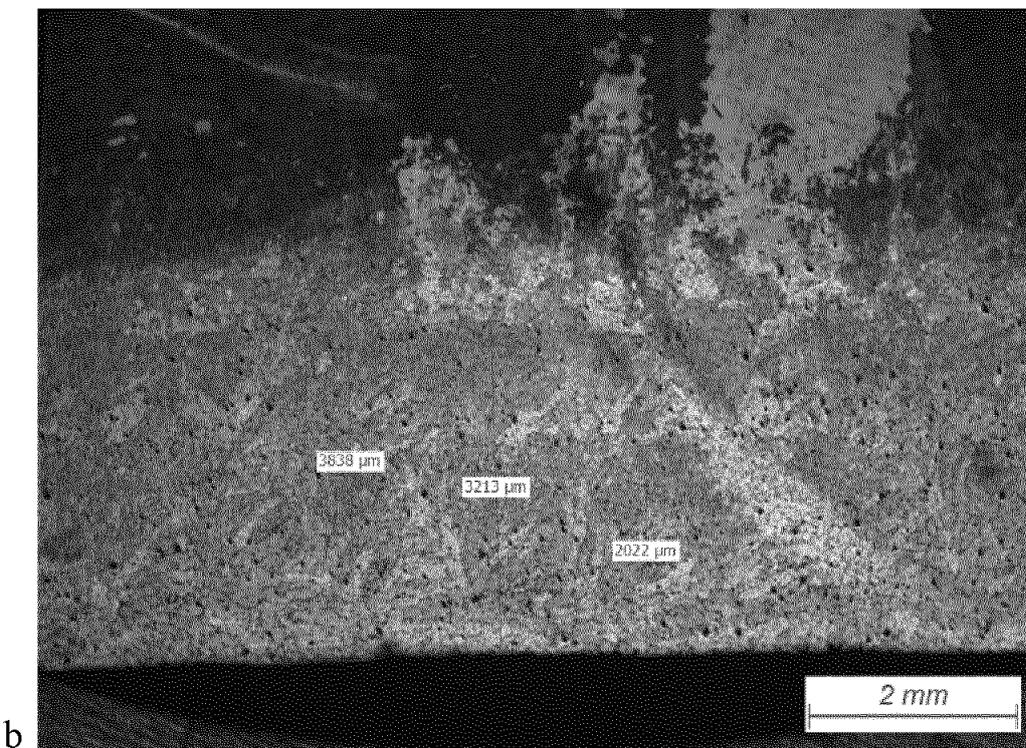
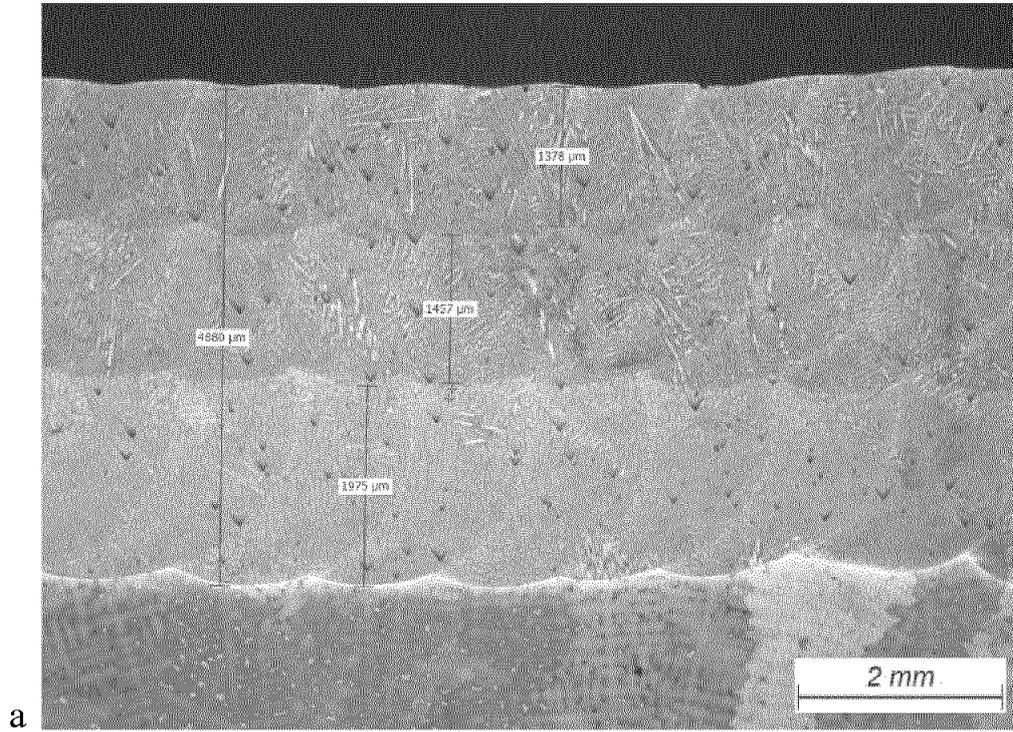


FIGURA 2

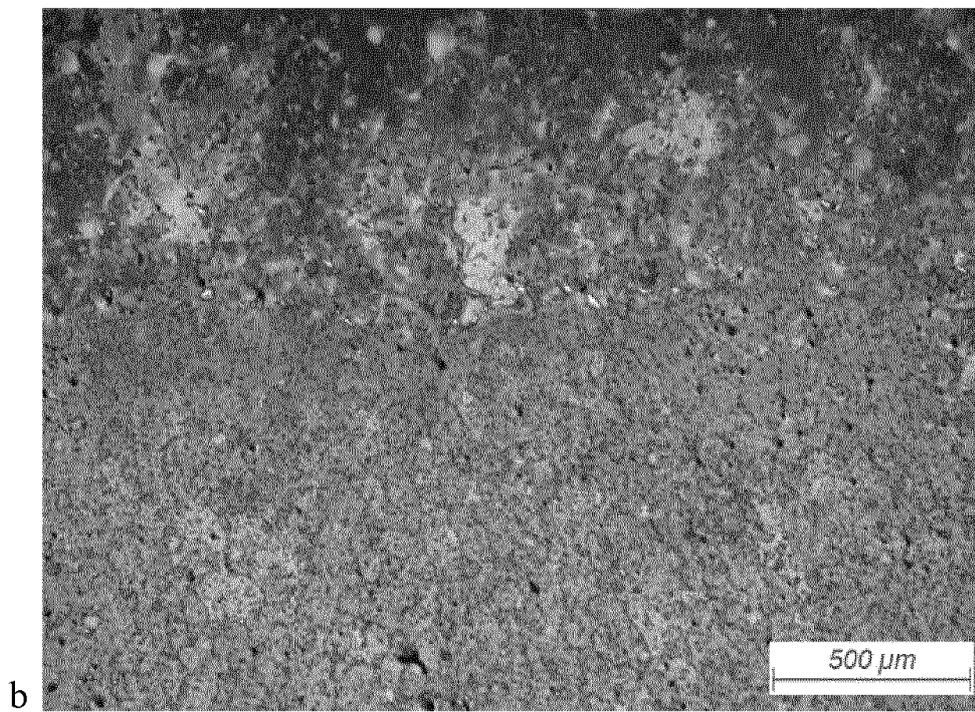
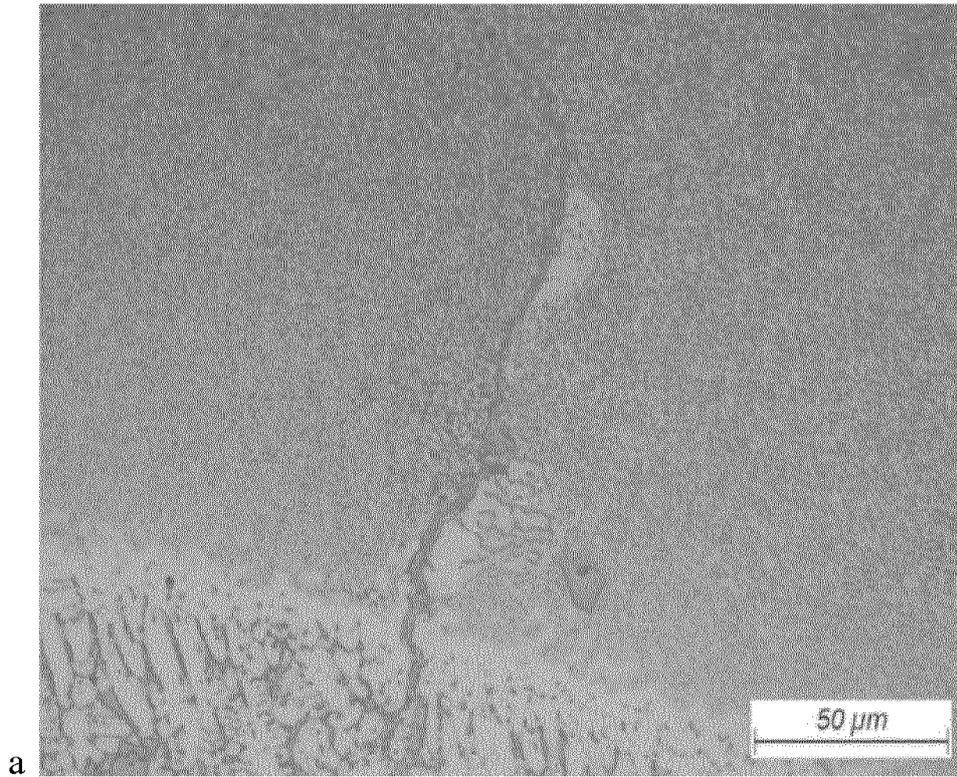


FIGURA 3

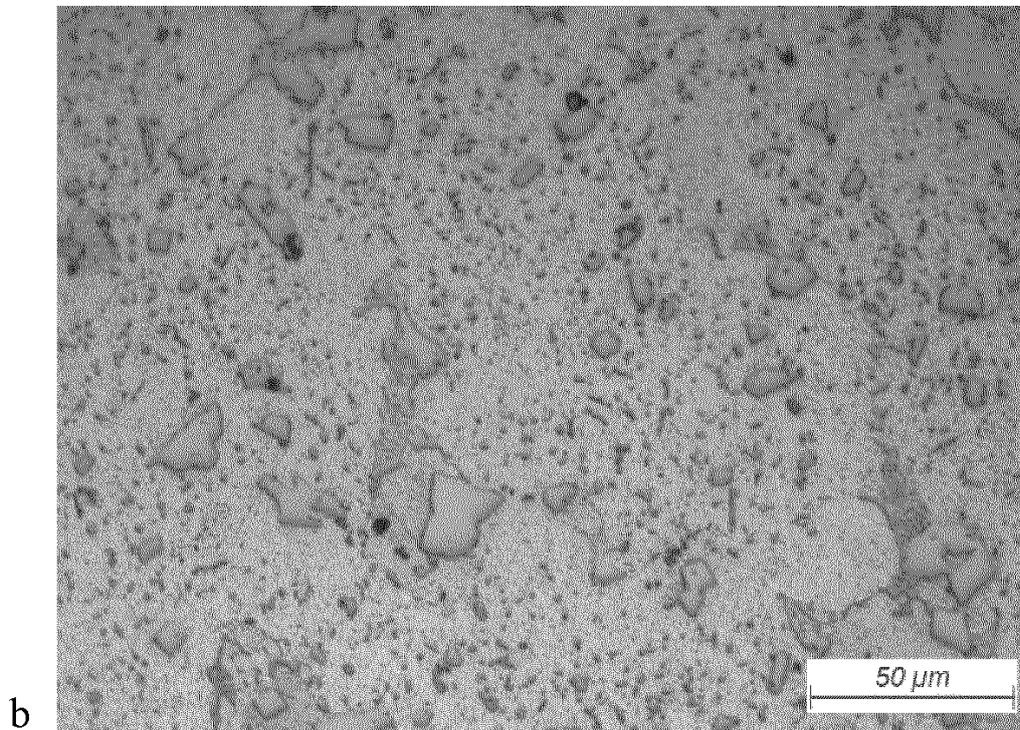
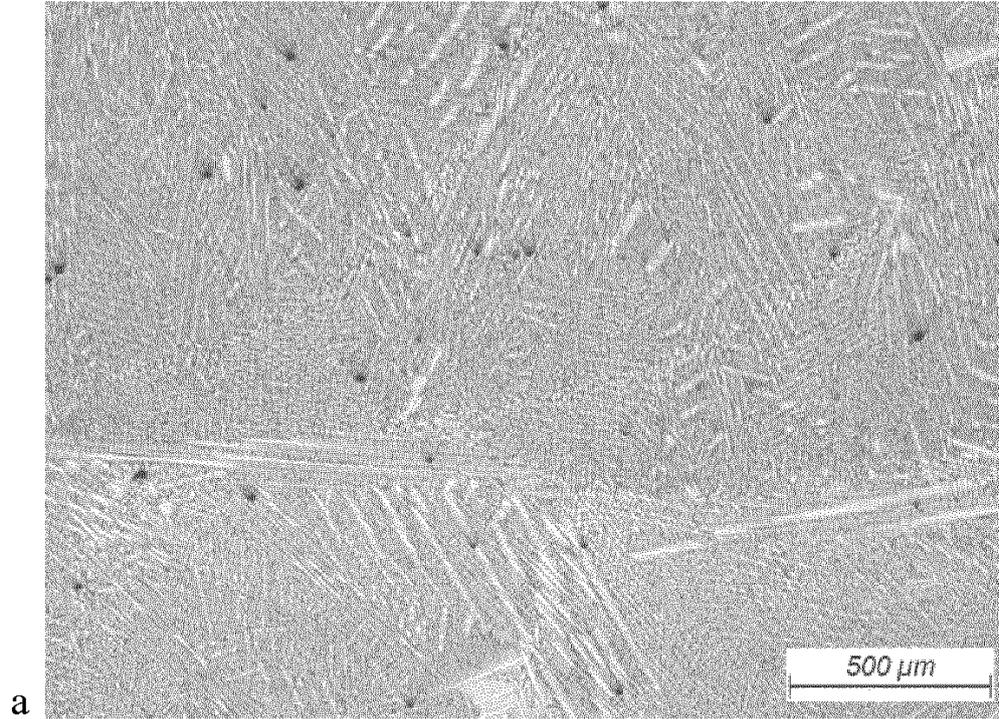


FIGURA 4

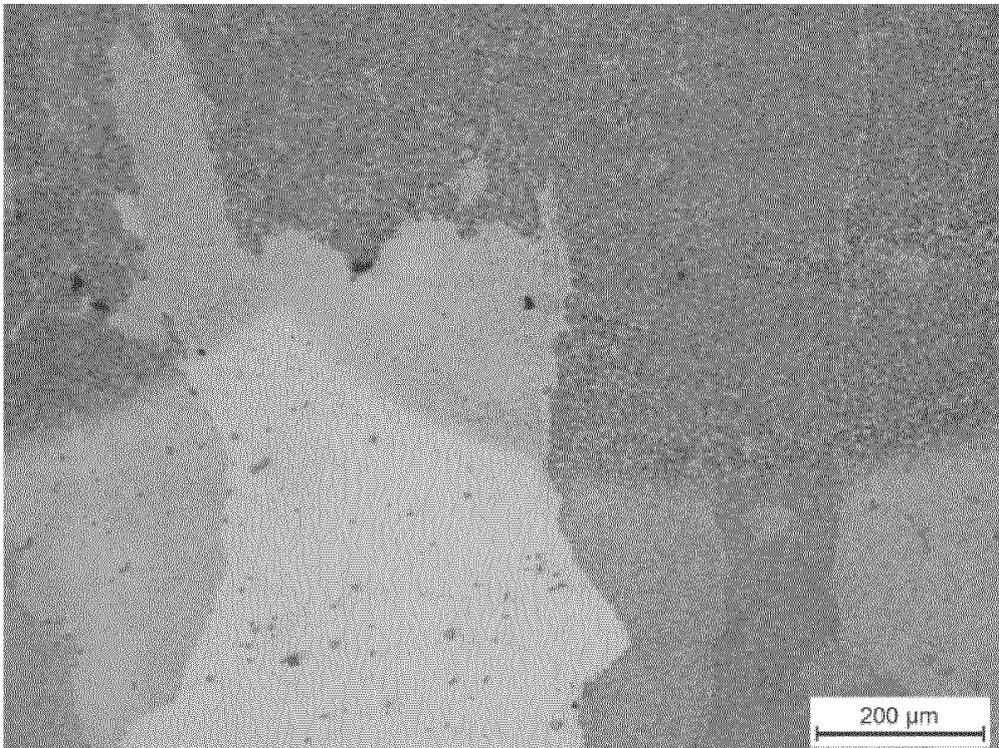
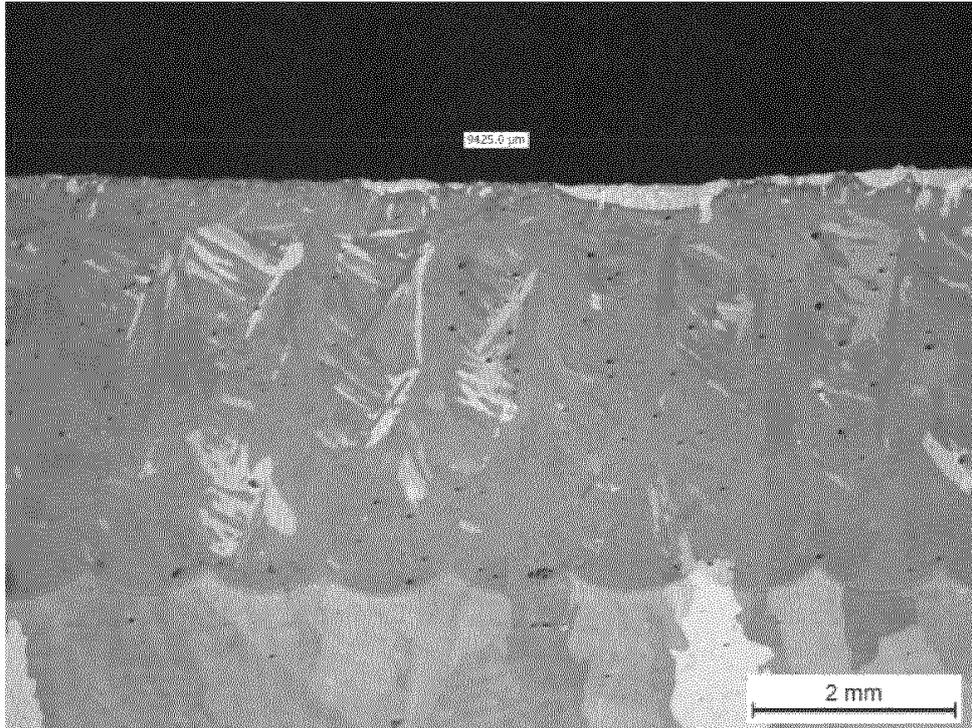


FIGURA 5

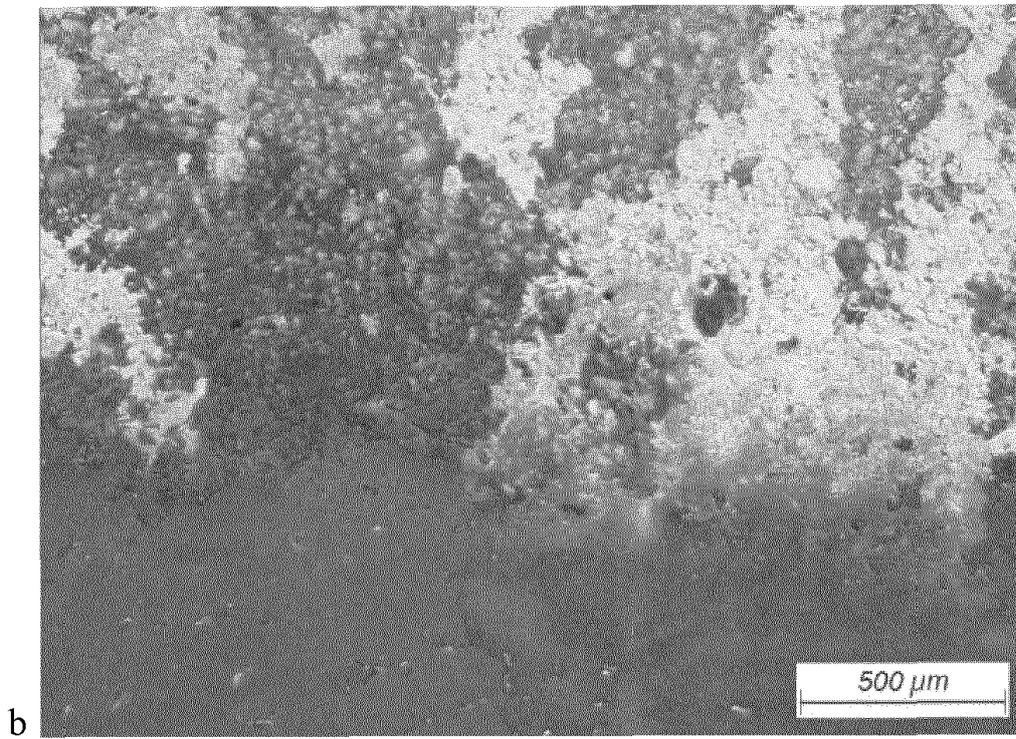
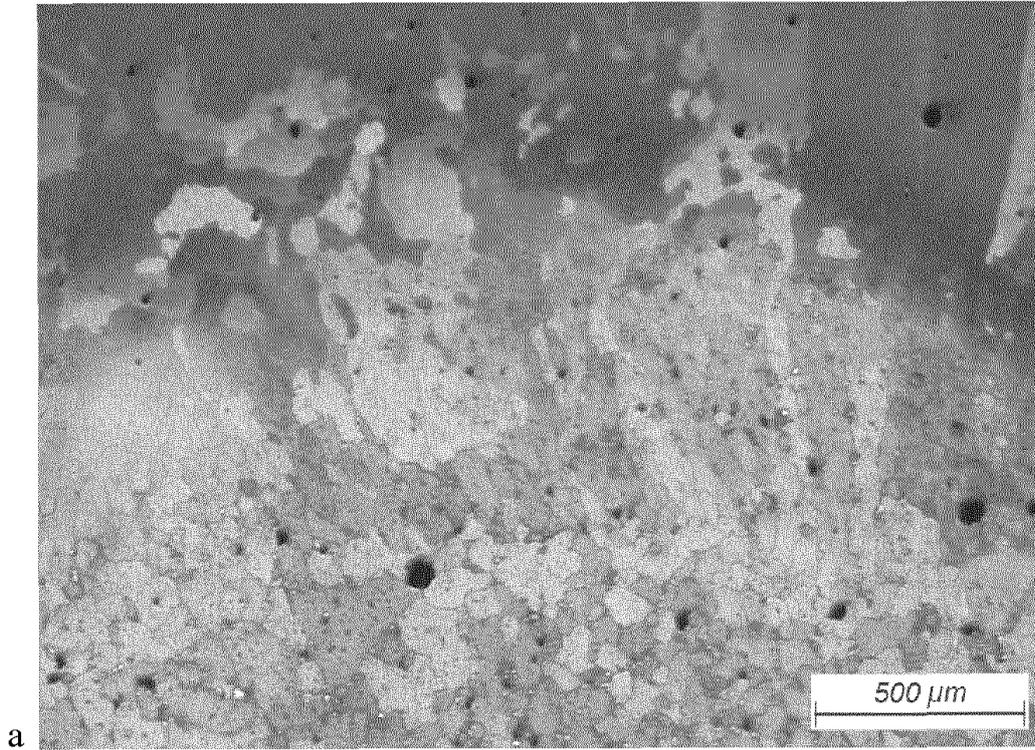


FIGURA 6



FIGURA 7

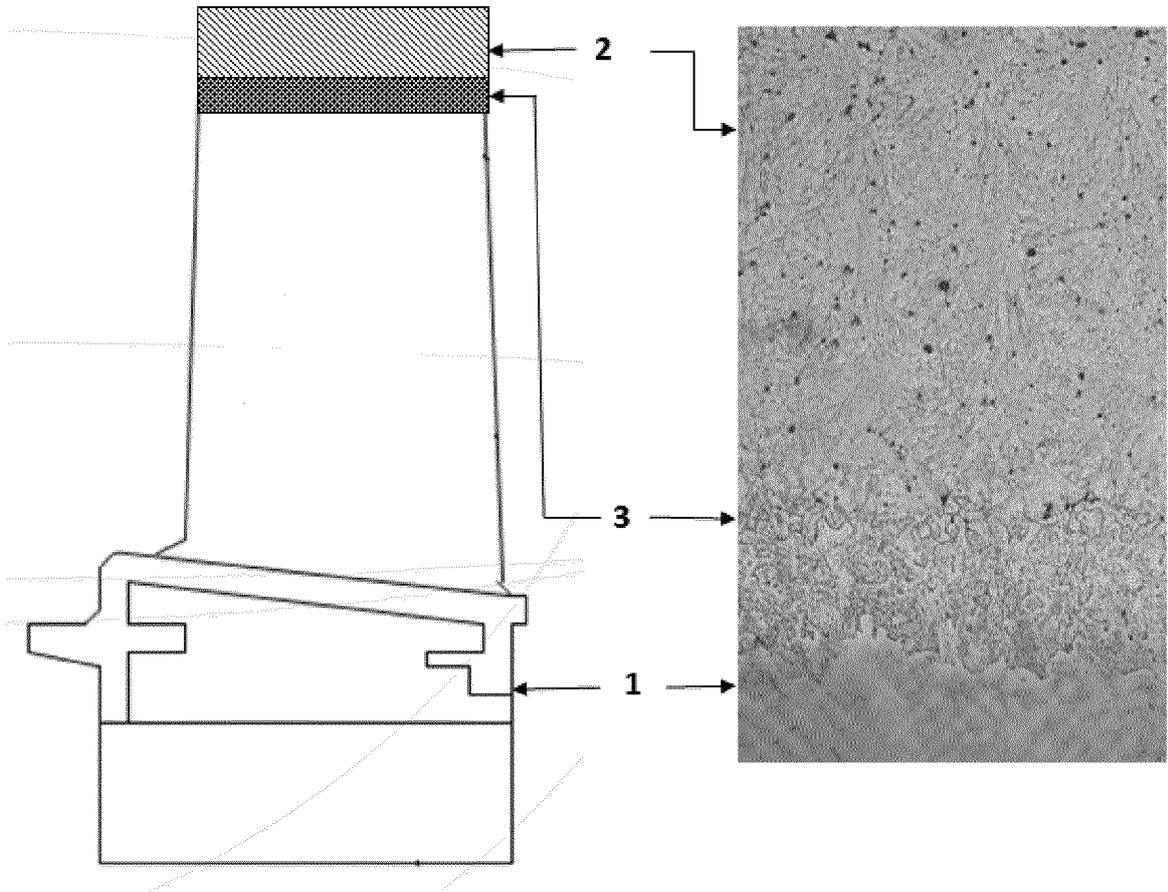


FIGURA 8