

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 847 498**

51 Int. Cl.:

<b>B23K 11/11</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/26</b>	(2006.01)	<b>C23C 2/40</b>	(2006.01)
<b>C23C 2/06</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/32</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/02</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/44</b>	(2006.01)		
<b>B32B 15/01</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/46</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/04</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/48</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/28</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/50</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/40</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/58</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/06</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/38</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/22</b>	(2006.01)	<b>C22C 38/54</b>	(2006.01)		
<b>C22C 38/24</b>	(2006.01)	<b>C23C 2/28</b>	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.02.2018 PCT/IB2018/051239**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.09.2018 WO18163017**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.02.2018 E 18709083 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.12.2020 EP 3592497**

54 Título: **Procedimiento de soldadura por puntos de resistencia para la unión de láminas de acero recubiertas con zinc**

30 Prioridad:

**07.03.2017 WO PCT/IB2017/000218**

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

**03.08.2021**

73 Titular/es:

**ARCELORMITTAL (50.0%)  
24-26 Boulevard d'Avranches  
1160 Luxembourg, LU y  
UNIVERSITE DE NANTES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**MUSIK, CÉLINE;  
ZHU, KANGYING;  
HUIN, DIDIER;  
MATAIGNE, JEAN-MICHEL;  
PERLADE, ASTRID y  
FRAPPIER, RENAUD**

74 Agente/Representante:

**PONTI & PARTNERS, S.L.P.**

**ES 2 847 498 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

Procedimiento de soldadura por puntos de resistencia para la unión de láminas de acero recubiertas con zinc

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento de soldadura por puntos de resistencia de láminas de acero recubiertas con zinc, para lograr una alta resistencia mecánica de las soldaduras y reducir el riesgo de formación de grietas debido a la fragilización por metal líquido, particularmente adaptado a los requisitos de la industria automotriz.
- 10 **[0002]** Las láminas de acero recubiertas con zinc o con aleación de zinc son muy eficaces para la resistencia a la corrosión y, por lo tanto, se utilizan ampliamente en la industria automotriz. Sin embargo, se ha experimentado que la soldadura por arco o resistencia de ciertos aceros puede causar la aparición de grietas particulares debido a un fenómeno llamado fragilización por metal líquido («LME», por sus siglas en inglés) o craqueo asistido por metal líquido («LMAC», por sus siglas en inglés). Este fenómeno se caracteriza por la penetración de Zn líquido a lo largo
- 15 de los límites de grano del sustrato de acero subyacente, bajo tensiones aplicadas o tensiones internas resultantes de la restricción, dilatación térmica o transformaciones de fases. Se ha reconocido que un nivel de tensión más alto aumenta el riesgo de LME. Dado que las tensiones que están presentes en una junta durante la propia soldadura dependen en particular de la resistencia del metal base, se reconoce que las soldaduras hechas de aceros con mayor resistencia son en general más sensibles a la LME.
- 20 **[0003]** Para reducir el riesgo de LME, la publicación EP0812647 describe un procedimiento en el que se realiza soldadura por arco de blindaje de gas usando un alambre de núcleo metálico que contiene Cu. Sin embargo, este procedimiento no está adaptado para la unión de láminas delgadas en la industria automotriz.
- 25 **[0004]** Además, el documento JP2006035293 describe un procedimiento de soldadura por arco usando un alambre de acero inoxidable para producir una soldadura que contiene más de 25 % de ferrita y para lograr una resistencia a la tracción en la soldadura inferior a 1,8 veces la resistencia a la tracción en el metal base. Sin embargo, además del hecho de que este procedimiento no esté adaptado a los requisitos de la industria automotriz, no se desea lograr una baja resistencia en la soldadura.
- 30 **[0005]** El documento JP2004211158 describe también un procedimiento para la soldadura por electrorresistencia (ERW, por sus siglas en inglés) de tubos, en el que hay 3-40 ppm de boro presentes en la composición de acero. Sin embargo, las conclusiones de este documento están relacionadas con las condiciones específicas del procedimiento de ERW y no pueden derivarse simplemente del procedimiento de soldadura por puntos
- 35 de resistencia. Además, la adición de B no es deseable en todos los grados de acero de alta resistencia.
- [0006]** Un procedimiento para la soldadura por puntos de resistencia para unir láminas de acero recubiertas con Zn se describe en el documento EP2138599.
- 40 **[0007]** Por lo tanto, es deseable contar con un procedimiento para fabricar soldaduras por puntos de resistencia de láminas recubiertas con Zn que concilien dos requisitos contradictorios:
- por un lado, obtener una soldadura por puntos de resistencia con altas propiedades de tracción según lo medido en el ensayo de cizallamiento con solape. Esta característica es generalmente mayor cuando se aumenta la resistencia
  - 45 a la tracción del metal base.
  - por otro lado, obtener una soldadura por puntos de resistencia con alta resistencia a la LME, cuya ocurrencia es generalmente menor cuando se disminuye la resistencia del metal base.
- [0008]** En particular, se desea contar con un procedimiento en el que la profundidad de las posibles grietas debidas a LME se mantenga en un valor inferior a 20 micrómetros, para no reducir el rendimiento mecánico de las soldaduras. Por la misma razón, también se desea minimizar la cantidad de grietas eventuales debido a que tienen una profundidad superior a 100 micrómetros.
- [0009]** La presente invención se define por la reivindicación independiente. Las realizaciones ventajosas se
- 55 exponen en las reivindicaciones dependientes.
- [0010]** Ahora, la invención se describirá en detalle y se ilustrará mediante ejemplos sin presentar limitaciones.
- [0011]** En primer lugar, las láminas de acero están provistas de un espesor (e) comprendido entre 0,5 y 3 mm,
- 60 que es un intervalo de espesor típico utilizado en la industria automotriz. Estas láminas pueden tener el mismo espesor o diferentes espesores. En este último caso,  $e_{m\acute{a}x}$  designa el espesor más alto de las láminas proporcionadas. Estas láminas son láminas recubiertas con zinc o recubiertas con aleación de zinc, esta última expresión designa recubrimientos en el que el contenido de Zn es superior al 50 % en peso. En particular, el recubrimiento se puede obtener mediante galvanización por inmersión en caliente («GI», por sus siglas en inglés) o mediante galvanización
- 65 por inmersión en caliente seguida inmediatamente por un tratamiento térmico a alrededor de 500-570 °C para provocar

- la difusión de hierro en el recubrimiento y para obtener un recubrimiento «galvannealed» o «GA» que contiene alrededor de 7-14 % de Fe. También puede ser un recubrimiento de zinc o aleación de zinc obtenido por un procedimiento de galvanoplastia o por un procedimiento de deposición al vacío. La aleación de Zn también puede ser un recubrimiento de Zn-Mg-Al, tal como, por ejemplo, un recubrimiento de Zn-3 %Mg-3,7 % Al, o un recubrimiento de Zn-1,2 %Al-1,2 %Mg. Al menos una lámina (A) de estas láminas recubiertas está hecha de un acero altamente moldeable con una resistencia a la tracción (RT) superior a 800 MPa y un alargamiento total (AT) tal como  $(RT) \times (AT) > 14000 \text{ MPa} \%$ . Las láminas de acero implementadas en la invención se fabrican a través de un procedimiento que comprende sucesivamente las etapas de fundición, laminado en caliente, bobinado, recocido opcionalmente intermedio, decapado, laminado en frío, recocido continuo y recubrimiento. En función de sus propiedades mecánicas, la composición y el procedimiento de fabricación, la microestructura de estas láminas contiene, en la fracción superficial entre 5 y 30 % de austenita retenida. Según el ciclo termomecánico en la línea industrial, estos aceros recubiertos pueden ser, por ejemplo, aceros TRIP (plasticidad inducida por transformación), aceros CFB (bainita libre de carburos) o aceros Q-P (temple y partición). La composición de la hoja altamente moldeable (A) contiene:
- 15
- Carbono: entre 0,05 % y 0,4 % en peso. Si el contenido de carbono es inferior al 0,05 %, la resistencia a la tracción es insuficiente y no se obtiene la estabilidad de la austenita retenida que está presente en la microestructura de acero para lograr un alargamiento suficiente. Por encima de 0,4 % de C, la soldabilidad se reduce porque se forman microestructuras de baja tenacidad en la zona afectada por el calor o en la zona fundida de la soldadura por puntos.
- 20 En una realización preferida, el contenido de carbono se encuentra en el intervalo de entre 0,13 y 0,25 %, lo que permite lograr una resistencia a la tracción superior a 1180 MPa.
- El manganeso es un elemento de endurecimiento de solución sólida que contribuye a obtener una resistencia a la tracción superior a 800 MPa. Tal efecto se obtiene cuando el contenido de Mn es de al menos 0,3 % en peso. Sin embargo, por encima de 8 %, su presencia contribuye a la formación de una estructura con bandas de segregación excesivamente marcadas que pueden afectar negativamente el endurecimiento de las soldaduras y las propiedades de uso de la parte estructural del automóvil. La capacidad de recubrimiento también se reduce negativamente. Preferentemente, el contenido de manganeso está en el intervalo de entre 1,4 % y 4 % para lograr estos efectos. Esto permite lograr una resistencia mecánica satisfactoria sin aumentar la dificultad de fabricación industrial del acero y sin aumentar la capacidad de endurecimiento en las aleaciones soldadas que afectarían negativamente la soldabilidad de la lámina reivindicada por la invención.
- 25
- El silicio debe estar comprendido entre 0,010 y 2,09 % para lograr la combinación solicitada de propiedades mecánicas y soldabilidad: el silicio reduce la precipitación de carburos durante el recocido después del laminado en frío de la lámina, debido a su baja solubilidad en cementita y al hecho de que este elemento aumenta la actividad del carbono en austenita. Por lo tanto, el enriquecimiento de austenita en carbono conduce a su estabilización a temperatura ambiente y a la aparición de un comportamiento de plasticidad inducida por transformación («TRIP») que significa que la aplicación de una tensión, durante la formación, por ejemplo, conducirá a la transformación de esta austenita en martensita. Cuando el Si es superior a 2,09 %, se podrían formar óxidos fuertemente adherentes durante el recocido antes de galvanizar por inmersión en caliente, lo que podría conducir a defectos superficiales en el recubrimiento. El contenido de silicio por encima de 0,5 % contribuye a una estabilización eficiente de la austenita, mientras que el contenido de Si por encima del 0,7 % contribuye a obtener una fracción superficial de austenita retenida comprendida entre 7 y 30 %.
- 30
- El aluminio debe estar comprendido entre 0,010 y 3,0 %. Con respecto a la estabilización de la austenita retenida, el aluminio tiene una influencia que es relativamente similar a la del silicio. Sin embargo, dado que el aluminio promueve eficientemente la formación de ferrita a alta temperatura, una adición excesiva de aluminio aumentaría la temperatura de Ac3 (es decir, la temperatura de la transformación completa del acero en austenita durante el calentamiento) durante la etapa de recocido, y por lo tanto haría que el procedimiento industrial fuera costoso en términos de energía eléctrica requerida para el recocido. El contenido de manganeso es inferior a 3,0 %.
- 35
- La austenita retenida entre 5 y 30 % a temperatura ambiente es necesaria para lograr un alto alargamiento total. La formabilidad es particularmente alta cuando la fracción superficial de austenita retenida comprende entre 7 y 30 %. Se obtiene una estabilización suficiente de la austenita mediante la adición de silicio y/o aluminio en la composición de acero, en cantidades tales como:  $(\text{Si} + \text{Al}) \geq 0,5 \%$ . Si  $(\text{Si} + \text{Al}) < 0,5 \%$ , la fracción de austenita retenida podría estar por debajo de 5 %, por lo que las propiedades de ductilidad y endurecimiento por deformación en la formación en frío son insuficientes. Sin embargo, si  $(\text{Si} + \text{Al}) > 3,5 \%$ , la capacidad de recubrimiento y la soldabilidad se ven afectadas.
- 40
- El cromo endurece y refina la microestructura, y permite controlar la formación de ferrita proeutectoide durante la etapa de enfriamiento después de mantenerla a la temperatura máxima durante el ciclo de recocido. En el caso de aceros que no contienen más de 2,8 % de Mn, la ferrita, cuando está presente en la fracción superficial superior al 40 %, aumenta el riesgo de que la resistencia a la tracción sea inferior a 800 MPa. Por lo tanto, el contenido de cromo es mayor que 0,001 % y menor que 1,0 % por razones de costo y para prevenir el endurecimiento excesivo.
- 45
- Como cromo, el molibdeno en una cantidad comprendida entre 0,001 % y 0,5 % es eficiente para aumentar la capacidad de endurecimiento y estabilizar la austenita retenida ya que este elemento retrasa la descomposición de la austenita.
- 50
- Los aceros pueden contener opcionalmente elementos susceptibles de precipitarse en forma de carburos, nitruros o carbonitruros, lo que puede proporcionar endurecimiento por precipitación. Para ello, los aceros podrán contener niobio, titanio o vanadio: Nb y Ti en una cantidad comprendida entre 0,005 y 0,1 %, y V en una cantidad comprendida
- 55
- 60
- 65 entre 0,005 y 0,2 %.

- Los aceros pueden contener opcionalmente níquel, en una cantidad comprendida entre 0,001 % y 1,0 % para mejorar la tenacidad.

- Los aceros pueden contener opcionalmente también boro, en una cantidad comprendida entre 0,0003 y 0,005 %. Al segregarse en el límite del grano, B disminuye la energía del límite del grano y, por lo tanto, es beneficiosa para aumentar la fragilidad del metal líquido de resistencia.

- El resto en la composición consiste en hierro y elementos residuales resultantes de la fabricación del acero. A este respecto, Cu, S, P y N al menos se consideran elementos residuales que son impurezas inevitables. Por lo tanto, su contenido es menor que 0,03 % para Cu, 0,003 % para S, 0,02 % para P y 0,008 % para N.

10 **[0012]** Las láminas de acero recubiertas con zinc o con aleación de zinc, con al menos una (A) de ellas que tienen la composición anterior, se superponen posteriormente y se unen mediante soldadura por puntos de resistencia. La soldadura puede ser homogénea (es decir, soldadura de láminas (A) juntas) o heterogénea (es decir, soldadura de una lámina de acero (A) con una o más láminas de acero recubiertas de Zn (B) con diferente composición).

15 **[0013]** La soldadura por puntos de resistencia es un procedimiento que combina la aplicación de una fuerza y un flujo de corriente, ejerciéndose ambos sobre las láminas superpuestas que se soldarán a través de electrodos de aleación de cobre. Una secuencia típica de soldadura comprende las siguientes etapas sucesivas:

- aproximación de los electrodos y aplicación de presión en las láminas

20 - secuencia de soldadura constituida por un cierto número de períodos durante los cuales la corriente fluye sucesivamente («pulsos», períodos «calientes») o no fluye (períodos «fríos»). Durante esta secuencia, los electrodos mantienen el esfuerzo en las láminas. Este esfuerzo permite reducir las porosidades de contracción y obtener refinamiento de granos.

25 - período de retención, durante el cual el esfuerzo se mantiene sin flujo de corriente, con el fin de contrarrestar la dilatación de la pepita de soldadura y enfriarla.

- separación de los electrodos de las láminas que han sido soldadas entre sí.

**[0014]** Al final de la secuencia, la soldadura se caracteriza por una pepita de metal de soldadura que se ha creado en la interfaz entre las láminas de acero. Encima de esta pepita, una depresión circular, llamada hendidura, está presente en la superficie de las láminas. El diámetro de hendidura (Diám.H) corresponde al diámetro de la punta del electrodo de soldadura. La profundidad de hendidura (Profund.H) puede comprender típicamente entre unas pocas decenas de micras y unos pocos cientos de micras. (Profund.H) depende de factores tales como:

35 - la intensidad de soldadura I

- el esfuerzo F ejercido por los electrodos durante la soldadura

- la duración del flujo de corriente  $t_i$

- la resistencia de contacto eléctrico inicial R en la interfaz entre las láminas

- la tensión de flujo  $\sigma_F$  a alta temperatura del acero

40 - el factor de concentración de esfuerzo  $K_t$  debido a la geometría de la punta del electrodo

- el espesor de la lámina e

**[0015]** Las otras variables siendo constantes, cuanto mayor I,  $t_i$ , R, F,  $K_t$ , mayor (Profund.H). Cuanto menor  $\sigma_F$ , mayor (Profund.H) (Profund.H) se puede medir directamente en soldaduras por puntos cortados o se puede medir durante el propio procedimiento de soldadura, como se explicará a continuación. Los inventores han puesto de manifiesto que el control de esta hendidura dentro de un intervalo específico permite resolver el problema de conciliar una resistencia mecánica de soldadura suficiente y una alta resistencia a LME.

**[0016]** La resistencia de la soldadura por puntos de resistencia generalmente se mide mediante un ensayo de cizallamiento por tracción con solape. A pesar de su aparente simplicidad, este ensayo incluye modos de solicitud complejos y mecanismos de falla. En la práctica, el modo de falla se considera como un índice de las propiedades mecánicas y se puede clasificar en interfacial, parcialmente interfacial y extraíble. Se desea el modo de extracción, en el que la fractura se produce en la periferia del botón en la zona afectada por el calor o en el metal base, ya que está asociado a la mayor resistencia y ductilidad de la soldadura. Este modo indica que la soldadura es capaz de transmitir un alto nivel de esfuerzo, causando así una deformación plástica significativa en las regiones adyacentes y aumentando la absorción de energía de deformación en condiciones de choque. Por el contrario, la falla de soldadura en la interfaz entre las láminas, que deja la mitad de la pepita de soldadura en cada lámina, ocurre a bajas cargas y puede afectar la distribución de la carga y causar la reducción de la energía absorbida en la estructura soldada. Tal modo de falla interfacial generalmente no es aceptable por la industria automotriz.

60

**[0017]** Los inventores han puesto de manifiesto que la hendidura (Profund.H) debe exceder un valor mínimo ((Profund.H)<sub>min</sub>) de 100 micras para garantizar que el modo de falla sea el modo de extracción. Sin limitarse a una teoría, se cree que cuando (Profund.H) > (Profund.H)<sub>min</sub>, la geometría de la pepita, es decir, su diámetro, altura y las características de concentración de tensión en la interfaz entre las láminas soldadas, hacen posible evitar la falla interfacial. Tales propiedades mecánicas se incrementan aún más y se obtienen de manera muy estable cuando

65

(Profund.H)<sub>min</sub> supera las 125 micras.

**[0018]** Sin embargo, los inventores también han puesto de manifiesto que la hendidura (Profund.H) debe mantenerse por debajo de un valor máximo (Profund.H)<sub>máx</sub> dependiendo de la composición de acero, con el fin de evitar grietas debido a la fragilización por metal líquido. Estas grietas, de tipo intergranular y llenas de Zn, ocurren con más frecuencia en la corona externa de la superficie de la hendidura que materializa la posición anterior de la punta del electrodo en la lámina.

**[0019]** Esta zona está más severamente deformada que la parte central de la zona de hendidura.

**[0020]** Por lo tanto, las grietas de esquina en esta zona externa se encuentran con más frecuencia que las grietas centrales en el área de hendidura. A través de las observaciones con la cámara de termografía infrarroja, los inventores han descubierto que la zona en el que están presentes grandes grietas en las esquinas corresponde a la zona en el que la temperatura máxima en el ciclo de soldadura ha excedido Ac3. Las grietas aparecen al final de la secuencia de soldadura como se define, a una temperatura superior a 700 °C. Según sus mediciones térmicas y observaciones metalográficas, los inventores han descubierto que no se experimenta ninguna grieta profunda LME, es decir, ninguna grieta más profunda que 50 micras, cuando la temperatura máxima en la ubicación del diámetro de hendidura, es decir, T<sub>máx</sub> (Diám.H) es menor que Ac3. En otras palabras, se evitan grietas profundas de LME si se seleccionan parámetros de soldadura tales como T<sub>máx</sub> (Diám.H) es menor que Ac3. Dado que esta condición se puede obtener a través de varias combinaciones de parámetros de soldadura, no sería posible definir simplemente más detalladamente tales combinaciones. Sin embargo, reducir I y t<sub>i</sub> y aumentar F y R, tienden a lograr este resultado.

**[0021]** Con base en las observaciones de que el craqueo de LME se produjo a una temperatura superior a 700°C, en las mediciones de deformaciones en la zona exterior crítica de la zona de hendidura y en la medición de deformaciones críticas en ensayos de tracción realizados en este intervalo de temperatura en un simulador térmico Gleeble, los inventores han descubierto que el craqueo de LME se evitó o se redujo mucho en la lámina de acero altamente moldeable (A) cuando la profundidad de hendidura (Profund.H) se mantuvo por debajo de un valor crítico (Profund.H)<sub>máx</sub> que dependía de la solubilidad de Zn en el sustrato de acero de (A), según la expresión:

$$(Profund.H) \leq (Profund.H)_{máx} = 18,68 (Zn_{sol}) - 55,1 \quad (1)$$

**[0022]** Zn<sub>sol</sub> es la solubilidad de Zn en el acero de la lámina (A) a 750 °C, en % en peso. Zn<sub>sol</sub> se mide directamente según el siguiente procedimiento que comprende las siguientes etapas sucesivas:

- 35 - tratar térmicamente la lámina de acero recubierta (A) a 750 °C durante 170 h. Esta etapa hace que la difusión de Zn en el sustrato de acero alcance el estado de equilibrio en la interfaz de Zn-sustrato.
- enfriar la lámina (A) a una velocidad superior a 50 °C/s, lo que permite mantener los gradientes químicos de alta temperatura a temperatura ambiente.
- medir el contenido de Zn en el acero a una distancia de 1 micra de la interfaz de recubrimiento de acero/Zn o aleación de Zn. Este contenido de Zn puede medirse, por ejemplo, mediante espectrometría dispersiva de energía de rayos X, que es una técnica conocida per se. En estas condiciones, el contenido de Zn medido a la distancia de 1 micra es el valor de la solubilidad Zn<sub>sol</sub>.

**[0023]** Alternativamente, no formando parte de la presente invención, Zn<sub>sol</sub> se puede calcular teniendo en cuenta el volumen o fracción superficial (estas dos cantidades son idénticas) de austenita que está presente en el acero (A) a 750 °C, y las solubilidades de Zn en ferrita y austenita a esta temperatura según la expresión:

$$Zn_{sol} = (1 - f_v) \times (Zn_{\alpha(750)}) + (f_v \times Zn_{\gamma(750)}) \quad (2)$$

- 50 en la que f<sub>v</sub> es la fracción en volumen de austenita existente en la lámina de acero (A) a 750 °C y está comprendida entre 0 y 1, y en la que Zn<sub>α(750)</sub> y Zn<sub>γ(750)</sub> son la solubilidad de Zn, respectivamente, en la ferrita y en la austenita del acero de la lámina (A) a 750 °C, en % en peso.

**[0024]** La solubilidad de Zn en ferrita a 750 °C depende de la temperatura peritéctica (T<sub>per</sub>) del acero (A) en presencia de recubrimiento de Zn (es decir, la temperatura por encima de la cual el sustrato de acero saturado con Zn está en equilibrio termodinámico con Zn líquido aleado con Fe y, finalmente, otros elementos sustitutivos del sustrato de acero), y de la solubilidad de Zn Zn<sub>α(T<sub>per</sub>)</sub> a la temperatura peritéctica. (T<sub>per</sub>) se determina mediante:

$$(T_{per}) = 782 + (2.5 Mn) - (71.1 Si) - (43.5 Al) - (57.3 Cr) \quad (3)$$

en el que (T<sub>per</sub>) está en °C, y Mn, Si, Al y Cr están en % en peso. Dependiendo de si (T<sub>per</sub>) es inferior o no a 750 °C,

Zn<sub>α(750)</sub> se puede calcular según:

$$Zn_{\alpha(750)} = Zn_{\alpha(T_{per})} \times \left(1 + 0.68 \times \frac{(T_{per}) - 750}{600 - (T_{per})}\right) \text{ si } (T_{per}) \text{ es } \geq 750^{\circ}\text{C} \quad (4),$$

y  
5

$$Zn_{\alpha(750)} = Zn_{\alpha(T_{per})} \times \left(1 - \frac{(T_{per}) - 750}{1160 - (T_{per})}\right) \text{ si } (T_{per}) \text{ es } < 750^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

**[0025]** La solubilidad de Zn a la temperatura peritética en ferrita se puede calcular según:

Zn<sub>α(T<sub>per</sub>)</sub> = 45,9 - (0,13 Mn) - (17,3 C) + (4,8 Si<sup>2</sup>) - (25,4 Si) - (1,53 Al) - (0,73 Cr) (6) en el que Zn<sub>α(T<sub>per</sub>)</sub> está en °C y Mn, C, Si, Al y Cr están en % en peso,

**[0026]** La solubilidad de Zn en austenita se determina mediante:

$$Zn_{\gamma(750)} = 2 \left( - \frac{b(750 - Ae1)^2}{(Ae3 - Ae1)} + b(750 - Ae1) \right) \quad (7)$$

15 con:

$$b = \frac{28}{2(Ae3 - Ae1) - 1} \quad (8)$$

20 en la que Ae<sub>1</sub> y Ae<sub>3</sub> se expresan en °C y son las temperaturas a las que comienza y termina la transformación de ferrita a austenita, respectivamente, la que tiene lugar en equilibrio en el sustrato de acero de la lámina (A).

**[0027]** Ae<sub>1</sub> y Ae<sub>3</sub> pueden medirse, por ejemplo, mediante técnicas habituales basadas en la dilatometría o pueden calcularse a partir de la composición de acero (A) según las siguientes expresiones:

$$A_{e1} = 725 - (42.1 \text{ Mn}) + (27.3 \text{ Si}) + (9 \text{ Al}) + (5 \text{ Cr}) \quad (9)$$

25

$$A_{e3} = 923 - (360 \text{ C}) - (34 \text{ Mn}) + (37.6 \text{ Si}) + (131.6 \text{ Al}) - (24.9 \text{ Cr}) \quad (10)$$

**[0028]** en las que Ae<sub>1</sub> y Ae<sub>3</sub> están en °C, y C, Mn, Al, Si, Cr están en % en peso. En un ejemplo particular, los inventores han puesto de manifiesto que el procedimiento de la invención se implementa ventajosamente tomando en consideración la composición local del acero justo debajo del recubrimiento con Zn o con aleación de Zn. En otras palabras, en lugar de considerar el contenido nominal de C, Mn, Si, Al y Cr en las expresiones (3), (6), (9) y (10) anteriores, los inventores han puesto de manifiesto que el riesgo de craqueo de LME se redujo de manera óptima al considerar el contenido promedio de los elementos: C<sub>prom</sub>, Mn<sub>prom</sub>, Si<sub>prom</sub>, Al<sub>prom</sub> y Cr<sub>prom</sub>, medidos bajo el zinc o sobre una profundidad comprendida entre 0 y 100 micras bajo el recubrimiento con Zn o aleación de Zn. Esta modalidad es especialmente relevante cuando un cierto nivel de segregación está presente a lo largo del espesor de la lámina o cuando un tratamiento térmico realizado en el sustrato de acero ha modificado la composición de la superficie antes de la etapa de recubrimiento. Por lo tanto, el promedio de las concentraciones locales en C, Mn, Al, Si y Cr, en una profundidad comprendida entre 0 y 100 micras puede ser diferente de la composición a granel en el acero, y son más relevantes para predecir la ocurrencia de LME. Como los inventores han demostrado que la gran mayoría de las grietas LME tienen una profundidad comprendida entre 0 y 100 micras, el contenido promedio en C, Mn, Al, Si y Cr se tiene en cuenta dentro de este intervalo de profundidad. Estos contenidos promedio se pueden medir mediante una técnica conocida per se, tal como, por ejemplo, espectroscopia de emisión óptica de descarga luminosa (GDOES, por sus siglas en inglés).

Según sus experimentos, los inventores también han puesto de manifiesto que el riesgo de ocurrencia de LME aumenta cuando la suma de los espesores de las láminas (A) y (B) es mayor que 2 mm. Por lo tanto, para garantizar que la profundidad promedio de grieta LME en las soldaduras de resistencia por puntos sea inferior a 40 mm, la suma de los espesores de las láminas (A) y (B) debe ser inferior a 3 mm. La profundidad promedio de grieta puede reducirse incluso a un valor inferior a 20 mm si la suma de los espesores de las láminas (A) y (B) no es superior a 2 mm. Por lo tanto, para garantizar que la profundidad promedio de grieta LME en las soldaduras de resistencia por puntos sea

menor que 40 o 20 mm, la suma de los espesores de las láminas (A) y (B) no debe ser superior a 3 o 2 mm respectivamente.

**[0029]** Como ejemplo particular, que no forma parte de la invención, la lámina de acero altamente moldeable (A) se suelda con al menos una lámina de acero galvanizado por inmersión en caliente (B) con una composición que contiene:  $C \geq 0,04\%$ ,  $Mn \geq 0,2\%$ , siendo el resto Fe e impurezas inevitables. Según los experimentos realizados por los inventores, la ocurrencia y gravedad de LME aumentan cuando la lámina de acero (B) es un acero con una composición con un contenido de C y Mn significativamente menor que el del acero (A), es decir, cuando el acero (B) tiene una composición como:  $C < 0,04\%$  y  $Mn < 0,2\%$ . Sin pretender limitarse a la teoría, se cree que la soldadura por puntos crea una zona fundida con una composición intermedia entre las láminas (A) y (B). Si la diferencia de composición entre (A) y (B) es grande, las temperaturas de transformación del acero (A) y la pepita serán muy diferentes, lo que significa que algunas zonas pueden experimentar una transformación de fase durante la etapa de enfriamiento del ciclo de soldadura, mientras que otras muy cercanas aún no han sufrido tal transformación. A medida que las fases de transformación ocurren con cambios de volumen, se cree que tal situación crea un aumento en las tensiones transitorias que son perjudiciales en vista de la fragilización por metal líquido. Por lo tanto, con el fin de mitigar la LME, dadas las composiciones implementadas en la invención, es preferible evitar proporcionar al acero (B) una composición con C bajo ( $C < 0,04\%$ ) y Mn bajo ( $Mn < 0,2\%$ ). La invención se ilustrará ahora mediante los siguientes ejemplos, que de ninguna manera son limitativos.

20 Ejemplo 1

**[0030]** Se han proporcionado tres láminas de acero, denominadas SA, SB y SC. La composición de estos aceros expresada en % en peso, siendo el resto hierro y elementos inevitables resultantes de la siderurgia, se presenta en la Tabla 1. Entre los elementos residuales o inevitables, el contenido de S es inferior al 0,003 % y el contenido de P es inferior al 0,014 % para estos aceros. Las láminas están recubiertas con un recubrimiento de Zn galvanizado, de 16 mm de espesor.

**[0031]** La solubilidad de Zn  $Zn_{sol}$  a 750 °C calculada según las expresiones (2-10) anteriores también se presenta en la Tabla 1 junto con las propiedades mecánicas de tracción de los aceros (RTM: Resistencia a la tracción máxima, AT: Alargamiento total) medida según la norma ISO 6892-1 publicada en octubre de 2009, las que se presentan en la Tabla 1. El espesor de las láminas de acero SA-SB es de 1 mm, el espesor de la lámina de acero SC es de 1,2 mm.

Tabla 1 Composiciones (% en peso), solubilidad de Zn a 750 °C y propiedades de tracción de los aceros

	C	Mn	Si	Al	Si+Al	Cr	Mo	Nb, V, Ti	Zn <sub>sol</sub> (%)	RTM (MPa)	RTMx AT (MPa%)
SA	0,20	1,65	1,63	0,06	1,69	0,03	0,002	Nb: 0,001 Ti: 0,006 V: 0,001	9,09	820	23780
SB	0,20	1,64	0,80	0,68	1,48	0,04	0,002	Nb: 0,001	15,9	805	23200
SC	0,219	2,07	1,48	0,034	1,514	0,35	0,002	Nb: 0,002b;	9,44	1233	16645

**[0032]** Las láminas de acero han sido soldadas por puntos de resistencia con un electrodo que tiene un diámetro de punta de 6 mm y una corriente alterna de 50 Hz bajo una fuerza de 350 daN. Según la intensidad y los tiempos de duración de la soldadura por resistencia, se han obtenido varias profundidades de hendidura. Por ejemplo, para el acero (SA), las condiciones de soldadura SA1, SA2, SA3... permiten obtener diferentes profundidades de hendidura.

**[0033]** La resistencia de las soldaduras por puntos de resistencia se ha medido mediante ensayos de cizallamiento por tracción con solape según la norma ISO 14273. El resultado del ensayo se considera satisfactorio si no se observa ninguna falla interfacial.

**[0034]** Las soldaduras se han decapado posteriormente en una solución diluida de HCl que contiene inhibidor para eliminar el recubrimiento de zinc, cortado y pulido para determinar y medir bajo un aumento de 2,5 a 100 veces, la posible presencia de grietas debido a fragilización por metal líquido. La profundidad de grieta se midió en diez soldaduras para obtener la profundidad promedio de grieta por cara de soldadura. Se desea obtener una profundidad promedio de grieta inferior a 20 mm.

**[0035]** Los resultados de las observaciones se presentan en la Tabla 2, junto con el cálculo de (Profund.H<sub>máx</sub>) según la expresión (1) anterior.

Tabla 2: Caracterización de grietas LME en las soldaduras y modo de falla de la soldadura en ensayos de tracción con solape Valores subrayados: no según la invención

Acero	Soldadura	Profundidad de hendidura máx (Profund.H <sub>máx</sub> ) (µm)	Profundidad de hendidura (Profund.H) (µm)	Profundidad de grieta promedio (µm)	Ausencia del modo de falla interfacial en el ensayo de tracción
SA	SA1;	114	70	0	<u>No</u>
	SA2;		110	0	Sí
	SA3;		<u>130</u>	35	Sí
	SA4;		<u>200</u>	<u>12</u>	Sí
SB	SB1;	241	75	0	<u>No</u>
	SB2;		150	16	Sí
	SB3;		<u>260</u>	<u>90</u>	Sí
SC	SC1;	121	70	18	<u>No</u>
	SC2;		<u>125</u>	<u>40</u>	Sí
	SC3;		<u>250</u>	<u>60</u>	Sí

5 Ejemplo 2:

**[0036]** La lámina de acero SC del ejemplo 1 se ha ensamblado a través de soldadura por puntos de resistencia a un acero SD, cuya composición se presenta en la Tabla 3, el resto es hierro e impurezas inevitables resultantes de la fabricación de acero.

10

Tabla 3: composición de acero SD (% en peso)

	C	Mn	Si	Al	Ti
SD	0,0018	0,083	0,006	0,053	0,04

**[0037]** Se proporcionó acero SD en forma de láminas de acero galvanizado por inmersión en caliente con diferentes espesores de 0,8 mm o 1,9 mm, con un recubrimiento Zn de 12 micras. Por lo tanto, se fabricaron soldaduras por puntos de resistencia con un espesor total de 2 o 3,1 mm. La profundidad promedio de grieta en la superficie de la soldadura por puntos de la lámina de acero SC se ha determinado de la misma manera que se explica en el ejemplo 1.

15

Tabla 4: Profundidad de grieta en soldaduras con diferentes espesores totales.

Espesor total de la soldadura (mm)	Profundidad de hendidura (Profund.H) (µm)	Profundidad de grieta promedio (µm)
2	71	19
3,1	<u>256</u>	<u>42</u>

20

**[0038]** Por lo tanto, reducir el espesor total por debajo de 3 o incluso 2 mm, permite fabricar las soldaduras por puntos con una profundidad de grieta promedio reducida.

Ejemplo 3

25

**[0039]** Una máquina de soldadura por puntos de resistencia con un gato neumático de 10 kN y un transformador de potencia eléctrica de 64 kVA ha sido equipada con un sensor capaz de registrar el desplazamiento vertical del electrodo de soldadura. La diferencia entre la posición del electrodo antes y después de la operación de soldadura, corresponde a la profundidad de hendidura (Profund.H). En paralelo, se ha proporcionado una cámara de alta velocidad y se ha hecho una marca en el electrodo de soldadura para que sea un índice para registrar la posición del electrodo durante la operación de soldadura. Después de la comparación con los valores de hendidura medidos en las propias soldaduras, se afirmó que los dos procedimientos (sensor y cámara de alta velocidad) fueron capaces de proporcionar con precisión el valor de (Profund.H)

30

35 **[0040]** En las condiciones explicadas en el ejemplo 1, el acero SB se ha proporcionado y soldado con ciclos de

soldadura que se han detenido cuando (Profund.H) alcanza un valor ya sea por encima de la profundidad máxima de hendidura  $Profund.H_{m\acute{a}x}$  según esta composición de acero, o por debajo de ella. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

5 Tabla 4: Caracterización de grietas LME y modo de falla en soldaduras interrumpidas según el valor de hendidura. Valores subrayados: no según la invención.

Acero	Soldadura	Profundidad de hendidura máx (Profund.H <sub>máx</sub> ) (µm)	Profundidad de hendidura en la parada (Profund.H) (µm)	Profundidad de grieta promedio (µm)	Ausencia del modo de falla interfacial en el ensayo de tracción con solape
SB	SB4;	241	160	13	Sí
	SB5;		<u>300</u>	<u>52</u>	Sí

[0041] Por lo tanto, el desplazamiento del electrodo se puede utilizar como una señal de entrada que indica que la operación de soldadura debe detenerse y para garantizar así la calidad de la soldadura.

10

Ejemplo 4

[0042] Se ha utilizado una cámara infrarroja con un detector InSb para medir la temperatura de la superficie de la lámina en la periferia inmediata del electrodo, es decir, en la ubicación del diámetro de hendidura (Diám.H). Durante el ciclo de soldadura, la temperatura aumenta hasta un máximo  $T_{m\acute{a}x}$  (Diám.H) antes de enfriarse una vez que se detiene la corriente. Por lo tanto, es posible comparar la temperatura medida  $T_{m\acute{a}x}$  (Diám.H) con la temperatura Ac3 del acero. Se han realizado ensayos en aceros SA-SB como se menciona en el ejemplo 1, utilizando diferentes parámetros para obtener diversas profundidades de hendidura. Se ha evaluado la presencia de grietas de esquina por LME, de más de 50µm de profundidad. Para los aceros SA y SB, los valores de Ac3 son 930 °C y 965 °C respectivamente.

20

Tabla 5: Caracterización de la temperatura y grietas en la periferia del área de hendidura. Valores subrayados: no corresponden a la invención.

Acero	Soldadura	Profundidad de hendidura (Profund.H) (µm)	$T_{m\acute{a}x}$ (Diám.H) (°C)	Presencia de grietas en las esquinas de más de 50 µm de profundidad
SA	SA4;	110	630	No
	SA5;	150	700	No
	SA6;	300	<u>950</u>	<u>Sí</u>
SB	SB6;	160	720	No
	SB7;	260	920	No
	SB8;	350	<u>980</u>	<u>Sí</u>

25 [0043] Por lo tanto, se observa que se evitan grietas profundas en las esquinas de LME cuando se seleccionan los parámetros de soldadura tales como  $T_{m\acute{a}x}$  (Diám.H) es menor que Ac3.

Ejemplo 5

30 [0044] El acero SC en estado no recubierto se ha calentado para producir una modificación de la composición en su superficie dentro de una profundidad de 100 micras, y posteriormente Zn recubierto por galvanoplastia para obtener un recubrimiento idéntico al del ejemplo 1. El contenido promedio  $C_{prom.}$ ,  $Mn_{prom.}$ ,  $Si_{prom.}$ ,  $Al_{prom.}$  y  $Cr_{prom.}$  bajo el zinc en una profundidad comprendida entre 0 y 100 micras bajo el recubrimiento de Zn se han medido mediante espectroscopia de emisión óptica de descarga brillante. La lámina de acero recubierta se ha soldado en una condición  
35 SC4 similar a la condición SC3 de la Tabla 2.

[0045] Se midió el número promedio de grietas con una profundidad superior a 100 µm por soldadura puntual. Estos resultados se presentan en la Tabla 6, junto con el cálculo de  $(Profund.H_{m\acute{a}x})$  según las expresiones (1-10) anteriores, teniendo en cuenta la composición nominal de la lámina de acero C, o la composición promedio sobre una  
40 profundidad comprendida entre 0 y 100 micras bajo el recubrimiento Zn.

Tabla 6 Cantidad de grietas en función de la composición a granel o superficial

Acero	Soldadura	Profundidad de hendidura máx (Profund.H <sub>máx</sub> ) (µm)	Número promedio de grietas LME por soldadura con una profundidad superior a 100µm
SC	SC3	121	3,4
	SC4 Composición superficial modificada a una profundidad de 100µm	176	1,5

**[0046]** Los ensayos SC3 y SC4 se han realizado a partir de la misma composición nominal de acero SC. Usar solo la composición nominal de acero SC para estos ensayos para el cálculo de la profundidad máxima de hendidura llevaría a la predicción de que los resultados de los ensayos serían los mismos. Sin embargo, en el ensayo SC4, el número de grietas grandes se reduce mucho en comparación con el ensayo SC3. Esto muestra que, en caso de que la superficie del acero experimente un cambio de composición, la profundidad máxima de hendidura debe calcularse a partir de la composición promedio sobre una profundidad de 100 micras, en lugar de a partir de la composición de acero a granel.

#### 10 Ejemplo 6:

**[0047]** Dos láminas de acero recubiertas con Zn, de 1,6 mm de espesor, que tienen la composición de acero SC en la tabla 1, se soldaron por puntos de resistencia para crear una soldadura SC4. Además, se ha soldado una lámina de acero SC, de 1,6 mm de espesor, con una lámina de acero SD, de 1,6 mm de espesor, que tiene la composición de la Tabla 3 para crear una soldadura SC5. El número de grietas en las dos soldaduras se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7 Número de grietas en función de la diferencia de composición entre las láminas de acero

Soldadura	Número promedio de grietas LME por soldadura
SC4;	6
SC5;	15

20

**[0048]** Como la lámina de acero SD es muy baja en C y en Mn, la diferencia de composiciones en C y Mn entre los aceros SC y SD es alta, y el riesgo de formación de grietas aumenta.

**[0049]** En comparación, en la soldadura homogénea SC4, el número de grietas es reducido.

25

**[0050]** Por lo tanto, debido a sus altas propiedades mecánicas, las soldaduras por puntos de resistencia hechas de aceros de alta resistencia moldeables fabricados según la invención se pueden usar con ganancias para la fabricación de piezas estructurales o de seguridad de vehículos automotores.

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para la soldadura por puntos de resistencia que comprende las siguientes etapas sucesivas de:
- 5
- proporcionar al menos dos láminas de acero con espesor (e) comprendido entre 0,5 y 3 mm, al menos una de las láminas es una lámina de acero recubierta con zinc o aleación de zinc (A) con una resistencia a la tracción (RT) superior a 800 MPa y un alargamiento total (AT) tal como  $(RT) \times (AT) > 14000 \text{MPa}\%$ , en el que la composición del sustrato de acero de (A) contiene, en peso:
- 10
- $0,05 \% \leq C \leq 0,4 \%$
  - $0,3 \% \leq Mn \leq Mn \leq 8 \%$
  - $0,010 \% \leq Al \leq 3 \%$ ;
  - $0,010 \% \leq Si \leq 2,09 \%$ ,
  - 15 con  $0,5 \% \leq Si + Al \leq 3,5 \%$ ,
  - $0,001 \% \leq Cr \leq 1,0 \%$
  - $0,001 \% \leq Mo \leq 0,5 \%$
  - y opcionalmente
  - $0,005 \% \leq Nb \leq 0,1 \%$ ;
  - 20  $0,005 \% \leq V \leq 0,2 \%$ ,
  - $0,005 \% \leq Ti \leq 0,1 \%$ ;
  - $0,0003 \% \leq B \leq 0,005 \%$
  - $0,001 \% \leq Ni \leq 1,0 \%$ ;
- 25 siendo el resto Fe e impurezas inevitables,
- realizar soldadura por puntos de resistencia de dichas al menos dos láminas de acero para producir una soldadura con una profundidad de hendidura (Profund.H) en la superficie de dicha lámina de acero (A) tal como:
- 30  $100 \mu\text{m} \leq (\text{Profund.H}) \leq 18,68 (Zn_{\text{sol}}) - 55,1$ ,  
en el que (Profund.H) está en micrómetros y en el que  $Zn_{\text{sol}}$  es la solubilidad de Zn en el acero de la lámina (A) a  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ , en % en peso y en el que  $Zn_{\text{sol}}$  se determina según el procedimiento que comprende las siguientes etapas sucesivas:
- proporcionar la lámina de acero recubierta (A) de la reivindicación 1, a continuación
  - 35 - tratar térmicamente dicha lámina de acero recubierta (A) a  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  durante una duración de 170 h, a continuación
  - enfriar la lámina (A) a una velocidad superior a  $50 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , a continuación
  - medir el contenido de Zn en el acero a una distancia de 1 micra de la interfaz de recubrimiento de acero/Zn o aleación de Zn.
- 40 2. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que al menos una de las láminas de acero soldadas a una lámina de acero (A) es una lámina de acero recubierta con zinc o aleación de zinc (B) y en el que la suma de los espesores de las láminas (A) y (B) no es superior a 3 mm.
3. Un procedimiento según la reivindicación 2, en el que la suma de los espesores de las láminas (A) y (B)
- 45 no es superior a 2 mm.
4. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 en el que  $(\text{Profund.H}) \geq 125 \mu\text{m}$ .
5. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que (Profund.H) se mide a través
- 50 del desplazamiento del electrodo de soldadura, y en el que el procedimiento de soldadura se detiene cuando (Profund.H) comprende entre 100 micras y  $18,68 (Zn_{\text{sol}}) - 55,1$ .
6. Un procedimiento según la reivindicación 5, en el que (Profund.H) se mide a través del desplazamiento del electrodo de soldadura y en el que el procedimiento de soldadura se detiene cuando (Profund.H) está comprendida
- 55 entre 125 micras y  $18,68 (Zn_{\text{sol}}) - 55,1$ .
7. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que los parámetros de soldadura se seleccionan de modo que la temperatura máxima alcanzada durante la soldadura en la parte externa de la zona de hendidura de la soldadura sea tal que:
- 60

$$T_{\text{máx}} (\text{Diám.H}) < \text{Ac}3$$