

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 572 612**

51 Int. Cl.:

**B22D 7/00** (2006.01)  
**C22C 38/02** (2006.01)  
**C22C 38/04** (2006.01)  
**C22C 38/06** (2006.01)  
**C22C 38/44** (2006.01)  
**C22C 38/46** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.03.2008 E 08722360 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.05.2016 EP 2141254**

54 Título: **Lingote de acero para forja y cigüeñal integral**

30 Prioridad:

**29.03.2007 JP 2007089336**  
**26.06.2007 JP 2007167849**  
**08.08.2007 JP 2007207100**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**01.06.2016**

73 Titular/es:

**KABUSHIKI KAISHA KOBE SEIKO SHO (100.0%)**  
**10-26 Wakinohama-cho 2-chome Chuo-ku**  
**Kobe-shi, Hyogo 651-8585, JP**

72 Inventor/es:

**NAGAO, MOTOHIRO;**  
**DEURA, TETSUSHI y**  
**ABIKO, TAKASHI**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 572 612 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**

Lingote de acero para forja y cigüeñal integral

**5 Campo técnico**

La presente invención se refiere a un lingote de acero para forja y un cigüeñal de tipo sólido producido a partir del lingote de acero para forja. El lingote de acero para forja y el cigüeñal de tipo sólido de acuerdo con la presente invención se usan ampliamente y de manera eficaz en las áreas industriales de máquinas, barcos, generadores eléctricos y otros; y son particularmente apropiados para partes que requieren elevada resistencia frente a la fatiga tal como partes de movimiento rotacional.

**Técnica anterior**

15 El Documento de Patente (JP-A n.º 336092/2006) describe un lingote de acero para forja donde, con el objetivo de mejorar la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno de un cigüeñal para barco: la media de redondez (en lo sucesivo denominado como redondez media) de las inclusiones presentes en el acero que tienen una longitud máxima de cordón de 1  $\mu\text{m}$  o más es de 0,5 o más; el número de inclusiones que tienen una longitud máxima de cordón de 20  $\mu\text{m}$  o más es menor de 40 piezas por cada 100  $\text{mm}^2$  y su redondez media es de 0,25 o más; y el número de inclusiones que tienen una longitud máxima de cordón de 1 a 10  $\mu\text{m}$  es de 100 piezas o más por cada 100.

25 El Documento de Patente 2 (JP-A n.º 194502/2002) describe un acero, con el objetivo de mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste de un cigüeñal: que comprende C: de 0,62 a 0,80 %, Si: 0,60 % o menos, Mn: De 0,30 a 1,80 %, S: de 0,04 a 0,35 %, Cr: de 0,05 a 0,50 %, Al: menos de 0,005 % y O: 0,0020 % o menos, estando el resto formado por Fe e impurezas inevitables; tras la forja en caliente, formada principalmente por perlita que tiene una fracción de ferrita pro-eutectoide de 3 % o menos; y que contiene inclusiones de tipo sulfuro de 20  $\mu\text{m}$  o menos de espesor.

30 El Documento US 6165289A divulga un lingote de acero para forja, en particular para cojinetes, sin información adicional sobre la distribución y tamaño de las inclusiones.

**Divulgación de la invención**

35 Los problemas recientes de las piezas para barcos son el agrietamiento por hidrógeno provocado por los defectos de hidrógeno y el deterioro de la resistencia frente a la fatiga provocada por los defectos de tipo inclusión. Por medio de las tecnologías convencionales anteriormente mencionadas, sin embargo, aunque se puede producir un lingote de acero para forja excelente en cuanto a maquinabilidad y resistencia frente al desgaste, no se ha producido un lingote de acero para forja que tenga una resistencia a la fatiga suficiente frente a la fractura ocasional incluso en un entorno de uso severo y una resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno suficientemente buena. La presente invención se ha establecido a la vista de las circunstancias anteriores y un objetivo de la presente invención es proporcionar un lingote de acero para forja y un cigüeñal de tipo sólido excelentes en cuanto a propiedades de fatiga y resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno.

45 Como medida usual para evitar el agrietamiento por hidrógeno, se distribuyen inclusiones de tipo MnS para capturar el hidrógeno en el acero. No obstante, las inclusiones de tipo MnS deterioran la resistencia frente a la fatiga del acero, aunque mejoran la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno. Por consiguiente, resulta muy difícil mejorar de forma simultánea por un lado la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y por otro, la resistencia frente a la fatiga que tienen una relación de correlación.

50 En tales circunstancias, los presentes inventores han descubierto que el contenido de hidrógeno del acero que provoca el agrietamiento por hidrógeno es mayor en la parte superior que en la parte inferior del lingote de acero. Como resultado de estudios adicionales, los presentes inventores: han adivinado que el agrietamiento por hidrógeno de un lingote de acero para forja se puede evitar sin deteriorar la resistencia frente a la fatiga del lingote de acero cuando la relación de densidad numérica de inclusiones en la parte superior del lingote de acero con respecto a la densidad numérica de inclusiones en la parte inferior del lingote de acero y el contenido de S (azufre) estrechamente relacionado con la formación de inclusiones satisfacen una determinada relación; y se ha establecido la presente invención.

60 Un lingote de acero para forja de acuerdo con la presente invención que logra el objetivo anteriormente mencionado es un lingote de acero para forja colado con un molde donde: la densidad numérica  $D_{\text{BOT}}$  de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observado sobre un corte transversal de acero es de 10 a 80 piezas/ $\text{cm}^2$  en la parte inferior del lingote de acero que varía desde el extremo inferior del lingote de acero hasta el 20 % inferior de la altura total del lingote de acero en la dirección de la gravedad; la densidad numérica  $D_{\text{TOP}}$  de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observado sobre el corte transversal del acero es de 20 a 90 piezas/ $\text{cm}^2$  en la parte superior del lingote de acero que varía desde el extremo superior del lingote de acero hasta el 20 % superior de la altura total

del lingote de acero; la densidad numérica de inclusiones de 40 µm o más en el diámetro más largo observado en el corte transversal es de 5 piezas/cm<sup>2</sup> o menos tanto en la parte inferior del lingote de acero como en la parte superior del lingote de acero; y se satisface la siguiente expresión (1).

[Expresión 1]

$$(D_{TOP} / D_{BOT}) \geq [S] / 18$$

donde, [S] representa el contenido (en ppm en masa) de S en el acero.

10 El lingote de acero para forja consiste en

- C: de 0,2 a 0,6 % (en % en masa, se aplica el mismo a continuación),
- Si: de 0,05 a 0,5 %
- Mn: de 0,2 a 1,2 %
- 15 Ni: de 0,1 a 3,5 %
- Cr: de 0,9 a 2,5 %
- Mo: de 0,1 a 0,7 %
- V: de 0,005 a 0,2 %
- Al: de 0,01 a 0,1 %
- 20 S: 0,005 % o menos
- Ti: 0,005 % o menos, y
- O: 0,0015 % o menos,

25 y opcionalmente uno o más de B, W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr y Te en una cantidad de un 0,1 % o menos estando el resto formado por hierro e impurezas inevitables, de las cuales P está limitado a un 0,03 % o menos.

Un cigüeñal de tipo sólido de acuerdo con la presente invención que logra el objetivo anteriormente mencionado se produce por medio de forja en caliente del lingote de acero para forja anteriormente mencionado.

30 La presente invención hace posible producir un lingote de acero para forja excelente en cuanto a propiedades de fatiga y resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno por medio de: ajuste de la densidad numérica de inclusiones finas en la parte inferior del lingote de acero, la densidad numérica de inclusiones finas en la parte superior del lingote de acero, y la densidad numérica de inclusiones bastas tanto en la parte superior del lingote de acero como en la parte inferior del lingote de acero y el contenido de S en el acero con una determinada relación.

35 Entonces, por medio de foja en caliente del lingote de acero para forja, es posible producir un cigüeñal de tipo sólido excelente en cuanto a propiedades de fatiga y resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno.

Por ejemplo, aunque se supone que un cigüeñal actual experimenta una carga que corresponde a un rendimiento de 2.000 kW por cilindro, se requiere un cigüeñal futuro para un recipiente grande que tenga propiedades de fatiga que soporten la disminución de tamaño y la reducción de peso de un motor que busca mejorar la eficiencia de combustible. Se requiere una relación de límite de resistencia (resistencia frente a la fatiga/resistencia frente a la tracción) de 0,45 o más, con el fin de cumplir con los requisitos anteriores, independientemente del tamaño del cigüeñal. La presente invención hace posible proporcionar un cigüeñal que satisface los requisitos anteriores.

#### 45 **Breve descripción de los dibujos**

La Figura 1 es una vista que muestra el estado de solidificación del lingote de acero producido por medio del método de preparación de lingote.

50 La Figura 2 es una vista que muestra un lingote de acero producido por medio de un método de preparación de lingote.

La Figura 3 es una fotografía SEM de un corte transversal de acero observado con un aumento de 2.000.

La Figura 4 es una fotografía SEM de un corte transversal de acero observado con un aumento de 200.

La Figura 5 es una fotografía SEM de un corte transversal de acero observado con un aumento de 200.

55 La Figura 6 es un gráfico que muestra los contenidos de hidrógeno en las partes superiores de lingotes de acero y partes inferiores de lingotes de acero.

La Figura 7 es un gráfico que muestra los resultados de evaluación sobre las relaciones límites de agrietamiento por hidrógeno y resistencia de lingotes de acero; la relación de las inclusiones entre la parte superior del lingote de acero y la parte inferior del lingote de acero se muestra a lo largo del eje vertical, y el contenido de S en el acero se muestra a lo largo del eje horizontal.

60 La Figura 8 comprende los gráficos que muestran la evaluación de las relaciones de límite de resistencia de lingotes de acero y la aparición de agrietamiento por hidrógeno; la Figura 8(a) muestra los resultados de las partes superiores de lingotes de acero y la Figura 8(b) muestra los resultados en las partes inferiores de lingotes de acero.

65

**Mejor modo de llevar a cabo la invención**

5 En un lingote de acero producido por medio de un método de preparación de lingotes, la densidad numérica de inclusiones aumenta en la parte inferior del lingote de acero que es una zona de cristal de precipitación y la parte superior de lingote de acero que es un sitio de solidificación final como se muestra en la Figura 1. Por consiguiente, la parte inferior del lingote de acero y la parte superior del lingote de acero son las partes que afectan de manera marcada a las propiedades de fatiga y resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno del lingote de acero; y son apropiadas como partes para especificar las características del lingote de acero.

10 En la presente invención, como se muestra en la Figura 2: se define parte inferior del lingote de acero como la parte que varía desde el extremo inferior del lingote de acero hasta un 20 % inferior de la altura total del lingote de acero en la dirección de la gravedad (cuando aparece la zona de cristal de precipitación, tomándose también en consideración las inclusiones que existen en la zona de cristal de precipitación en la parte anterior); y se define la parte superior de lingote de acero como la parte que varía desde el extremo superior del lingote de acero hasta un 20 % superior de la altura total del lingote de acero, respectivamente.

(Densidad numérica de inclusiones finas en la parte inferior del lingote de acero ( $D_{BOT}$ ): de 10 a 80 piezas/cm<sup>2</sup>).

20 Es posible mejorar la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno por medio de dispersión de inclusiones finas en el acero como se ha comentado anteriormente pero, con el fin de exhibir el efecto de manera eficaz, es necesario controlar las inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) observado sobre un corte transversal de acero en la parte inferior del lingote de acero hasta no menos de 10 piezas/cm<sup>2</sup> (preferentemente no menos de 20 piezas/cm<sup>2</sup>, y aún más preferentemente no menos de 30 piezas/cm<sup>2</sup>). Por el contrario, incluso las inclusiones finas, si están presentes de manera excesiva, como se muestra por medio de las microfotografías de barrido electrónico de las Figuras 3 a 5, se forman asociaciones de inclusiones y actúa como orígenes de fractura por fatiga de la misma forma que las inclusiones bastas. Por consiguiente, es necesario controlar las inclusiones finas observadas en el corte transversal del acero para que no sean mayores de 80 piezas/cm<sup>2</sup> (preferentemente no mayores de 70 piezas/cm<sup>2</sup>, y más preferentemente no mayores de 60 piezas/cm<sup>2</sup>).

30 De hecho, las inclusiones menores de 5  $\mu\text{m}$  también tienen resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y además las inclusiones de menos de 5  $\mu\text{m}$  se pueden contar como inclusiones finas. Debido que las inclusiones de menos de  $\mu\text{m}$  tienen casi la misma distribución característica que las inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$ , no obstante, es suficiente contar el número de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  con el fin de evaluar la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno. Por consiguiente, las inclusiones de menos de 5  $\mu\text{m}$  quedan excluidas del objeto de la cuenta y, por tanto, se mejora la conveniencia de los ensayos adicionales.

(Densidad numérica de las inclusiones finas en la parte superior del lingote de acero ( $D_{TOP}$ ): de 20 a 90 piezas/cm<sup>2</sup>)

40 En la parte superior del lingote de acero, es necesario controlar las inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) observadas sobre el corte transversal del acero para que no sean superiores a 20 piezas/cm<sup>2</sup> (preferentemente no sean mayores de 30 piezas/cm<sup>2</sup>, y aún más preferentemente no sean mayores de 40 piezas/cm<sup>2</sup>). Al contrario de lo que se ha comentado anteriormente, incluso las inclusiones finas, si están presentes de manera excesiva, forman asociaciones de inclusiones y actúan como el origen de fractura por agrietamiento de la misma manera que las inclusiones bastas. Por consiguiente, es necesario controlar las inclusiones finas observadas en el corte transversal del acero para que no sean mayores de 90 piezas/cm<sup>2</sup> (preferentemente no sean mayores de 80 piezas/cm<sup>2</sup> y todavía más preferentemente no sean mayores de 70 piezas/cm<sup>2</sup>).

(Densidad numérica de inclusiones bastas: 5 piezas/cm<sup>2</sup> o menos)

50 Las inclusiones bastas actúan como origen de la fractura por fatiga y además es necesario controlar las inclusiones bastas (no menos de 40  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) observadas sobre el corte transversal del acero para que no sean mayores de 5 piezas/cm<sup>2</sup> (preferentemente no sean mayores de 4 piezas/cm<sup>2</sup>, y aun preferentemente no sean mayores de 3 piezas/cm<sup>2</sup>) tanto en la parte superior del lingote de acero como en la parte inferior del lingote de acero.

$$55 \quad ((D_{TOP} / D_{BOT}) \geq [S] / 18)$$

60 Los presentes inventores han investigado el contenido de hidrógeno en un lingote de acero y han descubierto que el contenido de hidrógeno fue más elevado en la parte superior del lingote de acero que en la parte inferior del lingote de acero como se muestra en la Figura 6. Además, también se investigaron la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y la relación límite de resistencia en el parte superior del lingote de acero. Los resultados se muestran en la Figura 7. En la Figura 7, ( $D_{TOP}/D_{BOT}$ ) se muestra en el eje vertical y [S] se muestra en el eje horizontal, y un caso donde la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y la relación de límite de resistencia satisfacen determinados criterios se califica con el símbolo "•" y un caso donde no se satisfacen los criterios se califica con el símbolo "x", y los casos se muestran en la figura. Los criterios para evaluar son los mismos que los criterios de

evaluación de la "evaluación exhaustiva" de las Tablas 1 y 3 descritas a continuación.

[S] representa el contenido (ppm en masa) de S en el acero. Se comprende a partir de la Fig. 7 que, interponiendo la línea recta definida por la expresión  $(D_{TOP})/(D_{BOT}) = [S]/18$ , los casos del símbolo "•" aparecen sobre el lado superior de la línea recta y los casos del símbolo "x" aparecen sobre el lado inferior de la línea recta, respectivamente.

La Figura 7 muestra que, en la zona donde el contenido de S es elevado, cuando aumenta el valor de  $(D_{TOP})/(D_{BOT})$ , concretamente cuando aumenta el contenido de inclusiones finas en la parte superior del lingote de acero en comparación con la parte inferior del lingote de acero, tiene lugar el agrietamiento por hidrógeno en la parte superior del lingote de acero. No obstante, resulta notable que, en la región donde el contenido de S es bajo, no tiene lugar el agrietamiento por hidrógeno incluso cuando el valor de  $(D_{TOP}) / (D_{BOT})$  no es elevado. Por ejemplo, el agrietamiento por hidrógeno no tiene lugar incluso cuando el valor de  $(D_{TOP}) / (D_{BOT})$  es menor de uno.

Por ejemplo, mientras el valor permisible de hidrógeno en el acero es de 1,5 ppm en el caso donde el contenido de S en el acero sea de un 0,003 %, el valor permisible de hidrógeno es tan bajo como 1,0 ppm en el caso de que el contenido de S sea de un 0,001 %. Generalmente, cuando se produce un cigüeñal a partir de un lingote de acero, el intervalo de valor de hidrógeno es aproximadamente de 0,5 a 1,8 ppm.

Como se comenta posteriormente, los presentes inventores han hecho posible controlar el valor de hidrógeno hasta no más de 1,2 ppm y además es posible producir un lingote de acero para forja sin provocar agrietamiento por hidrógeno incluso cuando el contenido de S es de un 0,003 % o menos. Como resultado de ello, existe la posibilidad de reducir el contenido de S.

Generalmente, el agrietamiento por hidrógeno tiene lugar cuando el contenido de S se reduce con el fin de mejorar las propiedades de fatiga pero, a partir de la Figura 7, la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y las propiedades de fatiga se pueden mantener incluso cuando se reduce el contenido de S con tal de que se satisfaga la condición de  $(D_{TOP}) / (D_{BOT}) \geq [S]/18$ . De este modo, se estima que el equilibrio entre las propiedades de fatiga y la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno en el lingote de acero se pueden mejorar mejor que nunca.

(Forja en caliente)

Un lingote de acero para forja obtenido a través del proceso de preparación de lingotes anterior se conforma sucesivamente para obtener una forma de un producto intermedio tal como una barra redonda por medio de forja. Tras la conformación, se llevan a cabo inspecciones o composiciones intermedias, defectos, limpieza y otros y posteriormente, mediante aplicación de forja en caliente de nuevo, se conforma el producto intermedio para obtener la forma de un producto grande tal como un cigüeñal de tipo sólido, una articulación entre piezas o similar. Sucesivamente, tras aplicar el tratamiento térmico de acuerdo con las propiedades de producto requeridas, se aplica el tratamiento de acabado por medio de maquinizado y se genera el producto final.

Los siguientes procesos se evalúan como un procedimiento concreto para producir un cigüeñal de tipo sólido a partir del lingote de acero anterior. Es decir, se toma un lingote de acero completamente solidificado a partir de un molde y, a modo de preparación para la aplicación de la forja en caliente, se calienta hasta preferentemente 1.150 °C o más, más preferentemente hasta 1.180 °C o más, y todavía más preferentemente 1.200 °C o más. Sucesivamente, se forja en caliente el lingote de acero para dar lugar a una barra redonda o una forma gradual con una relación de forja de 3 o más. En el caso de la forja del lingote de acero, el lingote de acero se puede recalcar en la dirección de la altura de lingote de acero y someter posteriormente a forja ampliada hasta una longitud prescrita con el fin de comprimir los defectos internos. Tras la forja en caliente, se procesa el producto intermedio para obtener la forma de un cigüeñal de tipo sólido. De este modo, en el caso de la forja para la formación del cigüeñal de tipo sólido, bien se pueden formar las cigüeñas una a una o bien se puede formar una pluralidad de cigüeñas de forma simultánea por medio de bloqueo del cuerpo entero. Tras la conformación mediante forja, se produce un cigüeñal de tipo sólido de un tamaño prescrito por medio de maquinizado para el acabado. De lo contrario, se puede producir un cigüeñal de tipo sólido por medio de conformación para obtener una forma gradual a través de forja en caliente y posteriormente aplicación de maquinizado. Aún más, el cigüeñal de tipo sólido se puede estructurar para que tenga un saliente en un extremo del cigüeñal o salientes en ambos extremos. El número de salientes es de 3 a 12 por ejemplo.

(Composiciones químicas en lingote de acero)

Aunque la presente invención se caracteriza por controlar el tamaño y la densidad numérica de inclusiones que existen en el acero como se ha explicado anteriormente, la composición básica del acero debería ser la siguiente:

(C: de un 0,2 a un 0,6 %)

C es un elemento que contribuye a la mejora de la resistencia y, con el fin de proporcionar una resistencia suficiente al cigüeñal, C puede estar presente, por ejemplo, en: un 0,2 % o más; preferentemente un 0,25 % o más; y aún más preferentemente un 0,3 % o más. Si el contenido de C es excesivo, no obstante, la tenacidad del cigüeñal se deteriora, y además C se controla, por ejemplo hasta: un 0,6 % o menos; preferentemente un 0,55 % o menos; y aún

más preferentemente un 0,5 % o menos.

(Si: de un 0,05 a un 0,5 %)

5 Si funciona como un elemento de mejora de la resistencia y, con el fin de proporcionar resistencia suficiente al cigüeñal, Si puede estar presente, por ejemplo, en: un 0,05 % o más; preferentemente un 0,1 % o más; y más preferentemente un 0,15 % o más. Si el contenido de Si es excesivo, no obstante, la segregación con forma de V invertida se vuelve marcada y apenas se obtiene un lingote de acero limpio, y además se controla Si, por ejemplo, hasta: un 0,5 % o menos; preferentemente un 0,45 % o menos; y aún más preferentemente un 0,4 % o menos.

10

(Mn: de un 0,2 a un 1,2 %)

Mn es un elemento que mejora la templabilidad y también contribuye a la mejora de la resistencia y, con el fin de garantizar por un lado una resistencia suficiente y por otro la templabilidad, Mn está presente de manera deseable, por ejemplo, en: un 0,2 % o más; preferentemente un 0,5 % o más; y aún más preferentemente un 0,8 % o más. Si el contenido de Mn es excesivo, no obstante, se puede promover la segregación con forma de V invertida en algunos casos, y además se controla Mn, por ejemplo, hasta: un 1,2 % o menos; preferentemente un 1,1 % o menos; y aún más preferentemente un 1 % o menos.

15

20

(Ni: de un 0,1 a un 3,5 %)

Ni es útil como elemento que mejora la tenacidad y es recomendable que contenga Ni, por ejemplo, en: un 0,1 % o más; y preferentemente un 0,2 % o más. Si la cantidad de Ni es excesiva, no obstante, el coste aumenta, y además Ni se controla en: un 3,5 % o menos; y preferentemente un 3 % o menos.

25

(Cr: de un 0,9 a un 2,5 %)

Cr es un elemento eficaz para mejorar la templabilidad y la tenacidad y, con el fin de exhibir dichas funciones, Cr está presente, por ejemplo, en: un 0,9 % o más; preferentemente un 1,1 % o más; y aún más preferentemente un 1,3 % o más. No obstante, si el contenido de Cr es excesivo, se puede promover la segregación con forma de V invertida y apenas se produce acero de elevada limpieza en algunos casos, y además se controla Cr, por ejemplo, hasta: un 2,5 % o menos; preferentemente un 2,3 % o menos; y aún más preferentemente un 2,1 % o menos.

30

35

(Mo: de un 0,1 a un 0,7 %)

Mo es un elemento que funciona de manera eficaz para la mejora de la templabilidad, resistencia y tenacidad y, con el fin de exhibir dichas funciones de manera eficaz, Mo está presente, por ejemplo, en: un 0,1 % o más; preferentemente un 0,2 % o más; y aún más preferentemente un 0,25 % o más. Mo tiene un coeficiente de distribución de equilibrio pequeño y es susceptible de formar microsegregación (segregación normal) no obstante, y además se controla Mo, por ejemplo, en: un 0,7 % o menos; preferentemente un 0,6 % o menos; y aún más preferentemente un 0,5 % o menos.

40

(V: de un 0,005 a un 0,2 %)

V tiene efectos de endurecimiento por precipitación y separación estructural y es un elemento útil para mejorar la resistencia del acero. Con el fin de exhibir dichas funciones de manera eficaz, el contenido de V recomendado, por ejemplo es: un 0,005 % o más; y preferentemente de un 0,01 % o más. Cuando V está presente de manera excesiva, no obstante, se saturan los efectos anteriores y resulta económicamente ineficiente, y además V se controla hasta: un 0,2 % o menos; y preferentemente un 0,15 % o menos.

50

(Al: de un 0,001 a un 0,1 %)

Al es eficaz como elemento desoxidante en un proceso de fabricación de acero y también es eficaz para la resistencia por agrietamiento del acero. Por consiguiente, resulta recomendable que contenga Al, por ejemplo, en: un 0,01 % o más; y preferentemente un 0,015 % o más. Por el contrario, Al fija N en forma de AlN o similar, impide la función de fortalecimiento del acero por medio de la mezcla de N, V, y otros, combina con otros elementos diversos, da lugar a inclusiones no metálicas y compuestos intermetálicos y deteriora la tenacidad del acero en algunos casos, y además Al se controla, por ejemplo, hasta: un 0,1 % o menos; y preferentemente un 0,08 % o menos.

55

60

(S: un 0,005 % o menos)

Es probable que S forme inclusiones bastas en el acero para forja y además puede deteriorar la resistencia frente a la fatiga de un lingote de acero para forja o un cigüeñal en algunos casos. Por consiguiente, el contenido de S del acero se controla, por ejemplo, en: de 0,005 % o menos; preferentemente un 0,0045 % o menos; aún más preferentemente un 0,004 % o menos; y aún más preferentemente un 0,0035 % o menos.

65

Al mismo tiempo, cuando las inclusiones de tipo S fino están presentes en determinado valor de densidad numérica o más en un acero para forja, se forman muchos campos de tensión en el acero, y de este modo, es probable que las inclusiones de tipo S finas capturen hidrógeno excesivo que supera el límite de solubilidad de sólidos en el acero y tengan un efecto de mejora de la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno del acero.

5 Con el fin de garantizar dichas inclusiones de tipo-S se controla el contenido de S en el acero en: un 0,0002 % o más; preferentemente un 0,0004 % o más; aún más preferentemente un 0,0006 % o más; y aún más preferentemente un 0,0008 % o más.

10 Se puede ajustar el contenido de S controlando la composición de escoria durante el refinado en masa fundida. Más específicamente, el contenido de S en el acero se puede reducir elevando la relación de contenido de CaO con respecto a contenido de SiO<sub>2</sub> (CaO/SiO<sub>2</sub>, en lo sucesivo referido como "C/S" de forma ocasional) en la escoria. Además, como medio complementario, se puede reducir el contenido de S en el acero elevando la relación de contenido de CaO con respecto a contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en lo sucesivo referido como "C/A" de manera ocasional). Por el contrario, cuando se desea aumentar el contenido de S, se ajusta la composición de escoria para que se pueda reducir C/S y C/A.

(Ti: un 0,005 % o menos)

20 Ti forma nitruros bastos en el acero y deteriora la resistencia frente a la fatiga de un lingote de acero para forja o un cigüeñal en algunos casos. Por consiguiente, el contenido de Ti en el acero se controla, por ejemplo, hasta: un 0,005 % o menos; preferentemente un 0,004 % o menos; y aún más preferentemente un 0,003 % o menos. En este caso, Ti produce inclusiones finas tales como TiN, TiC y Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, se dispersa en el acero, ocluye y atrapa el hidrógeno excesivo superando el límite de solubilidad de sólidos en el acero, y tiene el efecto de mejorar la resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno del acero. Cuando se garantizan dichas inclusiones de tipo Ti, se controla el contenido de Ti en el acero, por ejemplo, hasta: un 0,0002 % o más; preferentemente un 0,0004 % o más; y aún más preferentemente un 0,0006 % o más.

30 Se puede ajustar el contenido de Ti regulando la relación entre la cantidad usada de una aleación que tiene un elevado contenido de impurezas de Ti (una aleación de baja calidad) y la cantidad usada de una aleación que tiene un bajo contenido de impurezas de Ti (un aleación de alta calidad) en los materiales auxiliares.

(O: un 0,0015 % o menos)

35 El oxígeno (O) es un elemento que forma óxidos tales como SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, y otros, se convierten en inclusiones, y deteriora la resistencia frente a la fatiga del lingote de acero. Por consiguiente, resulta deseable reducir O al máximo y se controla la cantidad de oxígeno total en: un 0,0015 % o menos, y preferentemente un 0,001 % o menos.

40 Las composiciones básicas de un acero para forja usadas en la presente invención son como se ha comentado anteriormente y el resto comprende Fe sustancialmente, pero puede contener impurezas inevitables en el acero. Como impurezas inevitables, por ejemplo, se confirman P y N y por ejemplo el contenido de P es: preferentemente un 0,03 % o menos; y más preferentemente un 0,02 % o menos. Además, es posible usar un acero para forja que contiene además otro elemento de manera intencionada dentro del intervalo que no afecte negativamente a las funciones anteriormente mencionadas de la presente invención.

50 Los ejemplos de otro elemento que se puede añadir intencionadamente son B que tiene un efecto mejorador de la templabilidad y W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr, Te y otros que son elementos fortalecedores de la solución de sólidos o elementos fortalecedores de la precipitación. Los elementos se pueden añadir independientemente o en combinación de dos o más tipos. Una cantidad de adición deseable de los elementos es, por ejemplo, aproximadamente un 0,1 % o menos en total.

### Ejemplos

55 La presente invención se explica a continuación más concretamente con ejemplos. No obstante, la presente invención no está sustancialmente limitada a los ejemplos y se puede modificar apropiadamente dentro del intervalo conforme a la esencia mencionada con anterioridad y a continuación, y se incluyen todas las modificaciones en el alcance tecnológico de la presente invención.

60 Es recomendable refinar el acero por medio del método explicado a continuación con el fin de: aumentar la limpieza del acero fundido colado en el molde; controlar de este modo la densidad numérica ( $D_{BOT}$ ) de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observado en el corte transversal del acero en un valor de aproximadamente 10 a 8 piezas/cm<sup>2</sup> en la parte inferior del lingote de acero, la densidad numérica ( $D_{TOP}$ ) de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observadas en un corte transversal en un valor de aproximadamente 20 a 90 piezas/cm<sup>2</sup> en la parte superior del lingote de acero, y la densidad numérica de inclusiones de 40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo en aproximadamente 5 piezas/cm<sup>2</sup> o menos; y cumplir la expresión (1).

El método de refinado es un método para producir un acero sin líneas altamente limpio por medio de: aplicación de un primer refinado-secundario al acero fundido sangrado desde un convertidor o un horno eléctrico; aplicar un tratamiento de desgasificación al acero fundido tras someter al primer refinado secundario; y aplicar el segundo refinado secundario al acero fundido una vez que se ha sometido al tratamiento de desgasificación.

5 Es decir, con el fin de producir acero de elevada limpieza que tiene una pequeña cantidad de inclusiones provocadas por la inclusión de escoria y una elevada limpieza, resulta eficaz aplicar el refinado secundario dos veces en el orden de tratamiento de refinado secundario, tratamiento de desgasificación y después tratamiento de refinado secundario de nuevo, para fundir el acero producido con un convertidor.

10 El primer tratamiento de refinado secundario es un tratamiento para ajustar las composiciones de acero a valores prescritos y el tratamiento de desgasificación es un tratamiento para retirar los componentes gaseosos tales como hidrógeno que existen en el acero fundido. Además, es necesario aumentar la densidad de potencial de agitación en ambos tratamientos al tiempo que se evita la inclusión de escoria que flota sobre la superficie del acero fundido hasta el mínimo posible.

15 Al mismo tiempo, se proporciona la función de salida a la superficie y separación de la escoria una vez que está incluida en el acero fundido durante el tratamiento de desgasificación, al segundo tratamiento de refinado secundario y es necesario agitar el acero fundido con una densidad de potencia de agitación baja para no provocar la inclusión de escoria adicional al tiempo que se calienta y se conserva el acero fundido.

20 Más específicamente, en el primer tratamiento secundario, se ajusta el caudal de gas inyectado para que la densidad de potencial de agitación sea de 5 W/tonelada o más (preferentemente 10 W/tonelada o más) y 60 W/tonelada o menos (preferentemente 50 W/tonelada o menos) y se lleva a cabo el acondicionamiento de la escoria para que la composición de escoria tras el tratamiento de desgasificación pueda satisfacer las expresiones  $\text{CaO}/\text{SO}_2 \geq 3,5$ ,  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,5 - 3,5$  y  $\text{T.Fe} + \text{MnO} \leq 1,0$ , en términos de % en masa. En este caso, T.Fe significa la cantidad total de átomos de hierro.

25 En el tratamiento de desgasificación, se ajusta el caudal de gas inyectado para que la densidad de potencia de agitación pueda ser de 50 W/tonelada o más y preferentemente de 60 W/tonelada o más y 200 W/tonelada o menos y preferentemente 160 W/tonelada o menos, hasta el punto medio (la mitad) del tratamiento de desgasificación y se ajusta el caudal de gas inyectado para que la densidad de potencia de agitación pueda ser de 140 W/tonelada o menos y preferentemente 120 W/tonelada o menos (excluyendo 0 W/tonelada) en el tratamiento de desgasificación satisfactorio (tras el punto medio).

30 En el segundo tratamiento secundario, se ajusta el caudal de gas inyectado de manera que la densidad de potencia de agitación pueda ser de 25 W/tonelada o menos y preferentemente de 20 W/tonelada o menos (excluyendo 0 W/tonelada).

35 Más específicamente, se adoptan los siguientes procedimientos.

40 En primer lugar, se transporta el acero fundido sangrado desde un convertidor o un horno eléctrico en una cuchara de colada hasta un aparato de refinado secundario y se aplica un primer tratamiento de refinado secundario (en lo sucesivo denominado como LF-I de forma ocasional). Todavía más específicamente, aunque el acero fundido se calienta hasta  $T_L =$  aproximadamente 1.600 °C por medio de generación de una descarga de arco, se añade flujo gracias a un medio de suministro de flujo y además se agita el acero fundido por medio de inyección de gas de Ar gracias a un medio de inyección de gas. Con respecto a la resistencia para la agitación del acero fundido, se ajusta el caudal de gas de Ar para que la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  computada con la expresión (2) siguiente pueda ser de 5 a 60 W/tonelada.

45 En este caso, en la computación de la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$ , la temperatura del gas de soplado inferior antes de la inyección  $T_0$  (temperatura de gas de Ar antes de la inyección) se fija en temperatura ambiente (298K) y la temperatura del gas de soplado inferior tras la inyección  $T_g$  (la temperatura de gas de Ar tras la inyección) se fija en la temperatura de acero fundido  $T_L$ .

50 Los fines principales de LF-I cuando se refina principalmente acero fundido sangrado desde un convertidor o un horno eléctrico a una cuchara de colada son calentar el acero fundido y ajustar las composiciones del acero fundido. Las composiciones de acero fundido y la temperatura del acero fundido no se pueden homogeneizar a menos que se aplique agitación apropiada en este caso. No obstante, la agitación excesiva del acero fundido tiende a incorporar la escoria incluso cuando las composiciones y la temperatura son homogéneas y la inclusión de escoria puede actuar como el origen de defectos a posteriori. Por consiguiente, la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  se fija en 5 a 60 W/tonelada. Haciendo eso, es posible homogeneizar las composiciones y la temperatura del acero fundido al tiempo que se evita la inclusión de escoria.

65

[Fórmula 2]

$$\varepsilon = \frac{371 \cdot Q_g \cdot T_L}{M_L} \left[ \ln \left( 1 + \frac{9,8 \cdot \rho_L \cdot h_0}{P} \right) + \left( 1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \right]$$

- 5         $\varepsilon$ : densidad de potencia de agitación (W/tonelada)  
 $T_0$ : temperatura del gas de soplado inferior tras la inyección (temperatura ambiente (298K))  
 $T_L$ : temperatura de acero fundido (K)  
 $M_L$ : cantidad de acero fundido (tonelada)  
 $\rho_L$ : densidad de acero fundido (kg/m<sup>3</sup>)
- 10         $Q_g$ : caudal de gas de soplado inferior (NI/min)  
 $T_g$ : temperatura de gas de soplado inferior tras la inyección (K)  
 $P$ : presión atmosférica (Torr)  
 $H_0$ : profundidad de acero fundido (m)
- 15        Por ejemplo, en el primer tratamiento de refinado secundario (LF-I), incluso aunque algunas condiciones tales como el tamaño de la cuchara de colada y la cantidad de acero fundido introducido realmente  $M_L$  sean diferentes, la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  adopta un valor de 4,7 a 67,2 W/tonelada ajustando  $Q_g/M_L$  a un valor de 0,30 a 3,75 NI/min-tonelada.
- 20        En este caso, en LF-I, con respecto al tipo y cantidad de flujo, se controla la temperatura de calentamiento y se ajusta la cantidad de carga de un material auxiliar (flujo) de manera que la composición de escoria pueda satisfacer simultáneamente las siguientes tres condiciones tras acabar el tratamiento de desgasificación de vacío que se comenta a continuación (en otras palabras, al comienzo del segundo tratamiento de refinado secundario);
- 25        (1) la masa de CaO es 3,5 veces o más la masa de SiO<sub>2</sub>,  
(2) la masa de CaO es de 1,5 a 3,5 veces la masa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y  
(3) la suma de la masa de T.Fe y la masa de MnO en la composición de escoria es de un 1,0 % o menos de la masa de escoria total.
- 30        Tras concluir el primer tratamiento de refinado secundario, se transporta el acero fundido junto con la cuchara de colada a un aparato de desgasificación a vacío y se aplica el tratamiento de desgasificación de vacío (a continuación denominado como VD de forma ocasional) al acero fundido. Más específicamente, la presión atmosférica  $P$  en la cuchara de colada se reduce a un valor próximo al vacío de aproximadamente 0,5 Torr por medio de activación de un sistema de gases de escape y, de este modo, evacuando el gas que existe por encima del acero fundido en la
- 35        cuchara de colada a través de una tubería de salida de gases. Además, se agita el acero fundido por medio de inyección de gas de Ar a través de un medio de inyección de gas. Por medio del método anterior, se retira el componente de gas tal como hidrógeno que sale del acero fundido.
- 40        El tiempo para VD es de aproximadamente 20 minutos en total y, durante la primera mitad de tiempo (antes del punto medio del tiempo de tratamiento, los primeros 10 minutos), se ajusta el caudal de gas de soplado inferior  $Q_g$  para que la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  pueda ser de 50 a 200 W/tonelada y, durante la segunda mitad de tiempo (tras el punto medio del tiempo de tratamiento, los segundos 10 minutos), se ajusta el caudal de gas de soplado inferior  $Q_g$  para que la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  pueda ser de 140 W/tonelada o menos (excluyendo 0 W/tonelada).
- 45        En VD, se retira hidrógeno del acero fundido, cuyo ajuste de composición está casi concluido y, en este caso también, resulta deseable adoptar una densidad de potencial de agitación  $\varepsilon$  que pueda evitar que la escoria se incluya en el acero fundido y que pueda lograr la deshidrogenación al mismo tiempo. Para ello, por medio del control de la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  en un valor de 50 a 200 W/tonelada durante la primera mitad del tiempo de
- 50        tratamiento VD, se puede lograr la deshidrogenación de manera eficiente al tiempo que se minimiza la inclusión de escoria. Además, controlando la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  en un valor de 140 W/tonelada o menos durante la segunda mitad de tiempo de VD, se puede acelerar la salida a superficie y separación de la escoria incorporada.
- 55        Además, en el caso de la realización presente, se puede producir un acero de elevada limpieza por medio de aplicación del segundo refinado secundario (en lo sucesivo denominado LF-II de forma ocasional) al acero fundido tras someter a VD. Es decir, una vez que ha concluido el tratamiento de desgasificación de vacío, se transporta el acero fundido a un aparato tratamiento de refinado secundario con la cuchara de colada y se aplica el segundo
- 60        tratamiento de refinado secundario al acero fundido. Más específicamente, aunque se caliente el acero fundido hasta  $T_L =$  aproximadamente 1.600 °C mediante la generación de una descarga de arco, se agita el acero fundido por medio de inyección de gas de Ar mediante un medio de inyección de gas. Con respecto a la resistencia para agitar el acero fundido, se ajusta el caudal de gas de Ar  $Q_g$  para que la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  computada con

la expresión (2) pueda ser de 25 W/tonelada o menos (excluyendo 0 W/tonelada).

Por medio de aplicación del tratamiento LF (LF-II) de nuevo de esta forma, es posible promover de forma adicional "la salida a superficie y la separación de la escoria incorporada y los productos de desoxidación" que tienen lugar a partir del punto medio de VD. En esta ocasión, la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  en LF-II debe ser de 25 W/tonelada o menos con el fin de evitar la inclusión de escoria adicional. Calentando y conservando el acero fundido a la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$ , se pueden lograr la salida a superficie y la separación de la escoria y los productos de desoxidación sin fallo alguno.

En este caso, como se ha comentado anteriormente, la composición de escoria de LF-II satisface las siguientes condiciones;

(1) basicidad, concretamente  $\text{CaO/SiO}_2 \geq 3,5$ ,

(2)  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3 = 1,5- 3,5$ , y

(3)  $\text{T.Fe} + \text{MnO} \leq 1,0 \%$  en masa

y además se puede evitar la reoxidación de las composiciones de acero fundido provocada por los óxidos en la escoria sin fallo alguno.

Adoptando el método de producción de un acero de elevada limpieza como se ha comentado anteriormente, es posible producir un acero de limpieza elevada que tenga una pequeña cantidad de inclusiones provocadas por la inclusión de escoria.

Se produce un lingote de acero vertiendo el acero fundido de elevada limpieza obtenido en el interior de un molde de clase de 10 a 90 toneladas (de 2 a 4 m de altura total) a través de un método de preparación de lingotes de vertido inferior. Se desmolda el lingote de acero solidificado, posteriormente se calienta hasta aproximadamente 1.300 °C, se forja en caliente, y se produce un material forjado con 150 a 700 mm de diámetro de corte transversal. Se aplica la forja en caliente por medio de estiramiento del lingote de acero con una máquina de prensado y posteriormente se conforma para dar lugar a un corte transversal redondo con una herramienta de finalidad especial.

En las Tablas 1 a 3, se muestra: las condiciones (Condiciones 1 a 20) en las cuales se modifican de diversa forma la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  en LF-I, la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  durante la primera mitad de tiempo de VD, la densidad de potencia de agitación  $\varepsilon$  en LF-II; además se llevan a cabo diversas condiciones de ensayos (números de ensayo 1 a 59) por medio de modificación de la basicidad ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) y los valores de  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{T.Fe} + \text{MnO}$  (% en masa; y los datos de las propiedades físicas de las piezas de ensayo a partir de las partes superiores y las partes inferiores de los lingotes de acero obtenidos).

En este caso, en las Tablas 1 a 3, en la fila "Homogeneización de temperatura y composición", cuando la variación del contenido de C se define como  $\Delta\text{C}$  y la variación de la temperatura se define como  $\Delta\text{T}$  desde el comienzo hasta el final de la colada del lingote de acero, un caso que cumple la expresión  $\Delta\text{C} \leq 0,01 \%$  y  $\Delta\text{T} \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$  se clasifica con el símbolo O y los otros casos se clasifican con el símbolo x.

En la fila de "Retirada de hidrógeno", se mide el contenido de hidrógeno [H] inmediatamente antes del final del refinado, y se clasifica un caso que cumple la expresión  $[\text{H}] \leq 1,2$  con el símbolo O y un caso que cumple la expresión  $[\text{H}] > 1,2 \text{ ppm}$  se clasifica con el símbolo x.

En la fila "Inclusión de escoria", un caso donde el número de inclusiones de 5  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo en observación superficial al microscopio de una muestra de acero fundido que tiene un contenido de Ca de 5 % o más es de 30 piezas/ $\text{cm}^2$  o menos se clasifica con el símbolo O y un caso donde el número excede 30 piezas/ $\text{cm}^2$  se clasifica como el símbolo x.

En las Tablas 1 y 3, el contenido de S (ppm en masa) del acero, la densidad numérica de las inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) en una parte que corresponde a la parte superior del lingote de acero ( $D_{\text{TOP}}$ ), la densidad numérica de inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) en una parte que corresponde a la parte inferior del lingote de acero ( $D_{\text{BOT}}$ ), la densidad numérica de inclusiones bastas (40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo) en una parte que corresponde a la parte superior de un lingote de acero, y la densidad numérica de inclusiones bastas (40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo) en una parte que corresponde a la parte inferior de un lingote de acero se muestran para cada una de las piezas de ensayo. El número de inclusiones se obtiene por medio de examen del número de inclusiones por 1  $\text{cm}^2$  en una superficie microscópica de una pieza de ensayo con EPMA (JXA-8900 I preparado por JEOL Ltd.).

En este caso, las composiciones químicas del acero de las piezas de ensayo son C: 0,3 %, Si: 0,25 %, Mn: 0,55 %, Ni: 1,6 %, Cr: 1,6 %, Mo: 0,25 %, V: 0,01 %, Al: 0,03 %, S: 0,002 %, Ti: 0,003 %, O: 0,0013 % y P: 0,01 %.

Además, se miden el valor de (DBOT) / (DTOP) x contenido de S en el acero (ppm en masa) (la expresión (1) se cumple cuando el valor es 18 o menos), el tamaño de la inclusión más grande (el símbolo O representa el caso del tamaño más grande ( $\phi$ : conversión de diámetro de esfera)  $< 0,5$  mm, el símbolo  $\Delta$  representa el caso de  $0,5$  mm  $<$  el tamaño más grande  $\leq 1,0$  mm, y el símbolo x representa el caso del tamaño más grande  $> 1,0$  mm) y la limpieza y los resultados obtenidos también se muestran en las Tablas 1 a 3. En este caso, los resultados en un caso donde la parte superior (T) o la parte inferior (B) de un lingote de acero no se identifican de manera distintiva, hacen referencia a los resultados de ensayo de la parte inferior del lingote de acero.

Nótese que, en la fila "Limpieza", un caso de DIN K(3)  $\leq 15$  se clasifica con el símbolo O y un caso de DIN K(3)  $> 15$  se clasifica con el símbolo x como los patrones DIN K3, y la limpieza se clasifica con el símbolo O en un caso donde se clasifica la parte superior de un lingote de acero con el símbolo O y también se clasifica la parte inferior de un lingote de acero con el símbolo O, la limpieza se clasifica con el símbolo  $\Delta$  en el caso donde bien la parte superior del lingote de acero o bien la parte inferior del lingote de acero se clasifican con el símbolo O y su otra parte se clasifica con el símbolo x, y la limpieza se clasifica con el símbolo x en un caso donde tanto la parte inferior del lingote de acero como la parte inferior de lingote de acero se clasifican con el símbolo x.

Además, en las Tablas 1 a 3, se describen las relaciones de límite de resistencia en la parte superior y la parte inferior del lingote de acero y los resultados de ensayo de agrietamiento por hidrógeno en la parte superior y la parte inferior del lingote de acero.

(Relación de límite de resistencia)

Se obtiene una relación de límite de resistencia = resistencia frente a la fatiga/resistencia frente a la tracción a partir de los resultados de un ensayo de resistencia frente a la tracción y un ensayo de resistencia frente a la fatiga a continuación. Las relaciones de límite de resistencia de la parte superior de un lingote de acero (T) y la parte inferior de un lingote de acero (B) se muestran por separado en las Tablas 1 a 3.

A continuación, también se muestran los resultados de evaluación de la relación de límite de resistencia en las Tablas 1 a 3 que muestran con el símbolo O en el caso de una relación de límite de resistencia  $\geq 0,45$ , el símbolo  $\Delta$  en caso de  $0,40 \leq$  relación de límite de resistencia  $\leq 0,45$ , y el símbolo x en el caso de una relación de límite de resistencia  $< 0,40$ .

(Resistencia frente a la tracción)

Se toman muestras de las piezas de ensayo de tracción de 6 mm de diámetro y 30 mm de longitud de calibre (dos piezas de ensayo para cada una) en las proximidades del centro de un acero con forma de barra redonda tras la forja; y se someten a resultados de tracción (JIS z 2204 y 2241) a temperatura ambiente. Los resultados de la parte superior de un lingote de acero (T) y la parte inferior de un lingote de acero (B) se muestran por separado con la unidad de MPa en las Tablas 1 a 3.

(Resistencia frente a la fatiga)

Se llevan a cabo ensayos de fatiga por flexión rotatoria con las piezas de ensayo que se muestran a continuación. Los resultados de ensayo de la parte superior del lingote de acero (T) y la parte inferior del lingote de acero (B) se muestran por separado con la unidad de MPa en las Tablas 1 a 3.

Pieza de ensayo: pieza de ensayo suave de 10 mm de diámetro,

Método de Ensayo: ensayo de fatiga por flexión rotatoria (relación de tensión = -1; revoluciones, 3.600 rpm),

Método de evaluación de resistencia frente a la fatiga: método de etapas,

Tensión de etapas: 20 MPa,

Número de piezas de ensayo: cinco piezas cada uno, y

Resistencia frente a la fatiga de cada pieza de ensayo = (Tensión de fractura) - (Tensión de etapas)

(Resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno)

Se lleva a cabo el ensayo de detección por ultrasonidos (UT) a una frecuencia de 4 MHz (más específicamente, "Defects of Forged Steel Products" editado por Forged Steel Study Section, Japan Steel Castings and Forgings Associations, P32-33). Un caso donde se detecta un defecto eco que muestra agrietamiento por hidrógeno en la parte intermedia (de 1/3 a 1/5R) del lingote de acero viene representado por el símbolo x que hace referencia al lingote de acero que es inferior en cuanto a resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno y un caso donde no se detecta el defecto eco viene representado por el símbolo O que hace referencia al lingote que es superior en cuanto a resistencia frente al agrietamiento por hidrógeno. En este caso, cuando la cara lateral (capa superficial) en la dirección de anchura del lingote de acero viene representada por OR y el centro viene representado por 1/2R, se

## ES 2 572 612 T3

define la parte central como una parte ubicada dentro del intervalo de  $1/2$  a  $1/3R$ , se define la parte intermedia como una parte ubicada dentro del intervalo de  $1/3$  a  $1/5R$ , y se define la parte de capa superficial como una parte ubicada dentro del intervalo de  $0R$  a  $1/5R$ .

- 5 En la fila "Evaluación exhaustiva", se clasifican un caso donde todas las relaciones de límite de resistencia en la parte superior del lingote de acero y la parte inferior del lingote de acero y los resultados de agrietamiento por hidrógeno y una parte superior del lingote de acero y una parte inferior del lingote de acero se clasifican con el símbolo O, se clasifica con el símbolo ●, y los otros casos se clasifican con el símbolo x.

10

[Tabla 1]

Número de ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Condición	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	6	7	7	7	7	7
ε en LF-I (Wt)	3	5	5	5	5	5	30	30	30	30	60	60	60	65	30	30	30	30	30	30
Homogeneización de temperatura y composición	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
ε en la primera mitad de VD (Wt)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	40	50	50	50	50	50
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en la segunda mitad de VD (Wt)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en LF-II (Wt)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Homogeneización de temperatura y composición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaO/SiO <sub>2</sub>	4,0	3,0	3,5	3,5	3,5	7,0	3,0	3,5	3,5	8,0	3,0	3,5	8,2	3,5	3,5	3,0	3,0	3,5	3,5	8,0
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	1,5	1,5	1,5	3,0	2,0	1,5	2,0	2,5	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,8	2,5
T.Fe + MnO (%)	1,0	0,8	1,2	0,8	0,9	0,9	0,7	0,7	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	1,2	1,1	0,7	0,9
Contenido de S en el acero (ppm)	40	50	30	30	10	45	45	15	40	30	35	15	20	10	15	40	30	20	12	9
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (T)	60	120	90	60	90	88	90	50	92	90	90	80	90	90	40	90	80	90	30	40
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (B)	90	60	60	20	80	25	80	30	60	55	100	80	80	50	62	10	48	70	10	80
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (T)	5	10	6	2	1	0	6	5	5	3	7	1	5	7	6	4	6	3	2	1
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (B)	6	5	4	5	0	5	6	4	2	4	6	3	5	6	10	2	8	0	1	2
B/T x [%S]	60	25	20	10	9	13	40	9	26	18	39	15	18	10	23	4	18	16	4	18
Tamaño de inclusión más grande	0	x	x	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	Δ	0	0	x	0	0	0
Limpieza	0	Δ	Δ	0	0	0	0	0	Δ	0	Δ	0	0	0	0	0	x	0	0	0
Agrietamiento por hidrógeno (T)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Agrietamiento por hidrógeno (B)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resistencia frente a la tracción (T)	840	900	960	1021	944	880	870	943	1023	982	900	1083	964	812	996	893	1005	975	925	860
Resistencia frente a la tracción (B)	790	870	900	968	873	820	820	881	943	925	878	1016	916	737	956	843	986	919	890	827
Resistencia frente a la fatiga (T)	386	297	346	470	453	431	339	462	348	491	351	520	434	309	329	420	352	468	435	404
Resistencia frente a la fatiga (B)	300	426	405	455	419	385	320	405	424	426	307	498	440	265	315	422	325	441	427	397
Relación de límite de resistencia (T)	0,46	0,33	0,36	0,46	0,48	0,49	0,39	0,49	0,34	0,50	0,39	0,48	0,45	0,38	0,33	0,47	0,35	0,48	0,47	0,47
Relación de límite de resistencia (B)	0,38	0,49	0,45	0,47	0,48	0,47	0,39	0,46	0,45	0,46	0,35	0,49	0,48	0,36	0,33	0,50	0,33	0,48	0,48	0,48
Evaluación de relación de límite de resistencia (T)	0	x	x	0	0	0	x	0	x	0	x	0	0	x	x	0	x	0	0	0
Evaluación de relación de límite de resistencia (B)	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	x	x	0	x	0	0	0



[Tabla 2]

Número de ensayo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Condición	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	11	12	12	12	12	13	14	15	16
ε en LF-I (Wt)	68	65	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Homogeneización de temperatura y composición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en la primera mitad de VD (Wt)	150	150	150	150	150	200	200	200	200	200	210	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en la segunda mitad de VD (Wt)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	15	20	20	20	20	90	140	150	100
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en LF-II (Wt)	15	20	15	25	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Homogeneización de temperatura y composición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaO/SiO <sub>2</sub>	3,0	3,5	3,5	6,0	9,5	3,0	3,5	3,5	6,5	8,0	4,0	3,5	3,0	3,5	3,5	6,5	7,8	5,5	3,5	4,0
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	2,5	2,5	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,8	2,5	2,0	1,6	2,0	2,0	1,9	2,5	1,9	2,0	1,9	2,5
T. Fe + MnO (%)	0,9	1,2	0,8	0,9	0,9	0,9	1,2	0,8	0,9	0,7	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,8	0,9	0,7	0,9	0,9
Contenido de S en el acero (ppm)	12	20	10	20	50	30	60	30	40	50	20	10	55	11	30	9	18	23	18	20
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (T)	30	95	20	40	90	90	90	90	85	90	55	48	92	88	90	41	78	60	90	92
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (B)	40	85	11	12	32	50	82	45	38	30	32	35	40	82	54	80	78	45	80	82
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (T)	7	6	2	3	5	8	6	2	0	1	8	7	10	8	5	4	3	5	12	6
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (B)	12	3	0	3	1	7	8	0	3	5	7	8	12	9	5	5	3	4	10	5
B/T x [%S]	16	18	6	6	18	17	55	15	18	17	12	7	24	10	18	18	18	17	16	18
Tamaño de inclusión más grande	Δ	Δ	0	0	0	Δ	Δ	0	0	0	0	0	Δ	Δ	0	0	0	0	Δ	Δ
Limpieza	Δ	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	x	Δ	0	0	0	0	0	Δ
Agrietamiento por hidrógeno (T)	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	0
Agrietamiento por hidrógeno (B)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resistencia frente a la tracción (T)	870	856	879	900	929	815	880	851	914	977	865	888	862	870	1080	1043	975	804	1012	857
Resistencia frente a la tracción (B)	840	812	803	840	887	770	825	791	840	930	822	824	801	825	980	971	896	789	936	804
Resistencia frente a la fatiga (T) [MPa]	296	308	431	450	446	277	317	426	420	459	294	320	284	331	486	511	478	402	324	291
Resistencia frente a la fatiga (B) [MPa]	344	309	385	386	399	254	272	388	412	419	304	305	264	281	480	447	439	387	318	306
Relación de límite de resistencia (T)	0,34	0,36	0,49	0,50	0,48	0,34	0,36	0,50	0,46	0,47	0,34	0,36	0,33	0,38	0,45	0,49	0,49	0,50	0,32	0,34
Relación de límite de resistencia (B)	0,41	0,38	0,48	0,46	0,45	0,33	0,33	0,49	0,49	0,45	0,37	0,37	0,33	0,34	0,49	0,46	0,49	0,49	0,34	0,38
Evaluación de relación de límite de resistencia (T)	x	x	0	0	0	x	x	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0	0	x	x
Evaluación de relación de límite de resistencia (B)	Δ	x	0	0	0	x	x	0	0	0	x	x	x	x	0	0	0	0	x	x
Evaluación exhaustiva	x	x	•	•	•	x	x	•	•	•	x	x	x	x	•	•	•	•	•	x

[Tabla 3]

Número de ensayo	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
Condición	17	17	17	17	17	17	17	18	18	18	18	18	18	19	19	19	19	19	20
ε en LF-I (W/t)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Homogeneización de temperatura y composición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en la primera mitad de VD (W/t)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en la segunda mitad de VD (W/t)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Retirada de hidrógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escorias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ε en LF-II (W/t)	10	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	30
Homogeneización de temperatura y composición	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inclusión de escoria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
CaO/SiO <sub>2</sub>	3.0	3.0	3.5	3.5	6.0	9.0	8.0	3.0	3.0	3.5	3.5	5.0	3.0	3.5	3.8	3.5	5.5	8.0	3.5
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.9	1.9	2.1	1.9	1.5	2.0	2.5	2.1	2.1	1.9	1.9	1.9	2.1	1.9	1.5	1.5	1.9	2.5	1.5
T.Fe + MnO (%)	0.9	0.9	1.1	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	1.1	0.9	0.9	0.8	1.1	1.1	0.9	0.8	0.9	0.8
Contenido de S en el acero (ppm)	8	15	22	28	36	16	50	15	8	48	12	33	21	28	6	14	8	48	15
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (T)	9	100	91	62	88	77	81	82	10	100	33	76	95	90	9	32	36	88	93
Densidad numérica de inclusiones de 5-10 μm (B)	10	90	75	39	44	80	24	82	9	100	48	38	85	93	9	18	80	33	84
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (T)	4	2	8	3	5	2	4	6	6	3	4	4	5	5	6	5	4	5	12
Densidad numérica de inclusiones de no menos de 40 μm de inclusiones (B)	4	5	5	1	4	0	5	6	2	5	0	2	5	5	4	5	5	2	10
B/T x [%S]	9	14	18	18	18	17	15	15	7	48	17	17	19	29	6	8	18	18	14
Tamaño de inclusión más grande	0	Δ	Δ	0	0	0	0	Δ	0	x	0	0	Δ	x	0	0	0	0	x
Limpieza	0	x	x	0	0	0	0	x	0	Δ	0	0	x	Δ	0	0	0	0	x
Agrietamiento por hidrógeno (T)	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Agrietamiento por hidrógeno (B)	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Resistencia frente a la tracción (T) [MPa]	929	937	908	1049	900	877	856	875	937	1032	937	1038	967	865	912	924	961	881	959
Resistencia frente a la tracción (B) [MPa]	898	882	832	981	840	834	798	809	868	968	879	997	903	798	851	865	886	840	902
Resistencia frente a la fatiga (T) [MPa]	362	347	309	514	423	403	419	333	337	361	440	498	377	398	356	434	442	441	297
Resistencia frente a la fatiga (B) [MPa]	296	326	399	461	386	409	383	275	304	358	396	459	334	303	323	415	425	386	289
Relación de límite de resistencia (T)	0.39	0.37	0.34	0.49	0.47	0.46	0.49	0.38	0.36	0.35	0.47	0.48	0.39	0.46	0.39	0.47	0.46	0.50	0.31
Relación de límite de resistencia (B)	0.33	0.37	0.48	0.47	0.46	0.49	0.48	0.34	0.35	0.37	0.45	0.46	0.37	0.38	0.38	0.48	0.48	0.46	0.32
Evaluación de relación de límite de resistencia (T)	x	x	x	0	0	0	0	x	x	x	0	0	x	0	x	0	0	0	x
Evaluación de relación de límite de resistencia (B)	x	x	0	0	0	0	0	x	x	x	0	0	x	x	x	0	0	0	x
Evaluación exhaustiva	x	x	x	•	•	•	•	x	x	x	•	•	x	x	x	•	•	•	x

En este caso, en los números de Ensayo 41, 49 y 55 de la Tabla 3, el motivo por el cual las relaciones de límite de resistencia (B) se clasifican con el símbolo x incluso aunque los números de las inclusiones bastas de las partes inferiores del lingote de acero sean más pequeñas que el valor convencional, es que tiene lugar agrietamiento por hidrógeno en las piezas de ensayo y la resistencia frente a la fatiga se deteriora debido al agrietamiento.

5 Además, en la Figura 8(a), la densidad numérica ( $D_{TOP}$ ) de las inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) en la parte que corresponde a la parte superior del lingote de acero se muestra en el eje vertical, y la densidad en número de las inclusiones bastas (40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo) en la parte que corresponde a la parte superior del lingote de acero se muestra en el eje horizontal. Entonces, un caso en que la evaluación exhaustiva se clasifica con el símbolo • se muestra con el símbolo •, y un caso donde tanto la relación de límite de resistencia como el resultado de ensayo de agrietamiento por hidrógeno se clasifican con el símbolo x, se muestra con el símbolo x. En un caso donde el valor ( $D_{TOP}$ ) es menor que 20 piezas/ $\text{cm}^2$ , tiene lugar el agrietamiento por hidrógeno y el caso se clasifica con el símbolo x.

10  
15 Aún más, en un caso donde el valor ( $D_{TOP}$ ) supera 90 piezas/ $\text{cm}^2$  y un caso donde la densidad numérica de inclusiones de 40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más grande supera 5 piezas/ $\text{cm}^2$ , no se obtiene una relación límite de resistencia prescrita y los casos se clasifican con el símbolo x.

20 Además, en la Figura 8(b), la densidad numérica ( $D_{TOP}$ ) de inclusiones finas (de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo) en la parte que corresponde a la parte inferior del lingote de acero se muestra en el eje vertical, y la densidad numérica de inclusiones finas (40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo) en la parte que corresponde a la parte inferior del lingote de acero se muestra en el eje horizontal. Entonces, un caso donde la relación de límite de resistencia o el resultado de ensayo de agrietamiento por hidrógeno se clasifica con el símbolo x se muestran con el símbolo x. En un caso donde el valor ( $D_{BOT}$ ) es menor que 10 piezas/ $\text{cm}^2$ , tiene lugar agrietamiento por hidrógeno y el caso se clasifica con el símbolo x.

25  
30 Además, en un caso donde el valor ( $D_{BOT}$ ) supera 80 piezas/ $\text{cm}^2$  y un caso donde la densidad numérica de inclusiones de 40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo supera 5 piezas/ $\text{cm}^2$ , no se obtiene una relación de límite de resistencia prescrita y los casos se clasifican con el símbolo x.

## REIVINDICACIONES

1. Un lingote de acero para forja colado con un molde donde:

5 la densidad numérica  $D_{BOT}$  de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observadas en un corte transversal del acero es de 10 a 80 piezas/cm<sup>2</sup> en la parte inferior del lingote de acero que varía desde el extremo inferior del lingote de acero hasta 20 % de la parte inferior de la altura total del lingote de acero en la dirección de la gravedad;

10 la densidad numérica  $D_{TOP}$  de inclusiones de 5 a 10  $\mu\text{m}$  en el diámetro más largo observadas en un corte transversal es de 20 a 90 piezas/cm<sup>2</sup> en la parte superior del lingote de acero desde el extremo superior del lingote de acero hasta 20 % de la altura total del lingote de acero;

la densidad numérica de inclusiones de 40  $\mu\text{m}$  o más en el diámetro más largo observadas en un corte transversal es de 5 piezas/cm<sup>2</sup> o menos tanto en la parte inferior del lingote de acero como en dicha parte superior del lingote de acero; y

15 se satisface la siguiente expresión (1):

$$(D_{TOP} / D_{BOT}) \geq [S] / 18$$

20 donde, [S] representa el contenido (en ppm en masa) de S en el acero; y el lingote de acero para forja consiste en

C: de 0,2 a 0,6 % (en % en masa, se aplica el mismo a continuación),

Si: de 0,05 a 0,5 %

25 Mn: de 0,2 a 1,2 %

Ni: de 0,1 a 3,5 %

Cr: de 0,9 a 2,5 %

Mo: de 0,1 a 0,7 %

V: de 0,005 a 0,2 %

Al: de 0,01 a 0,1 %

30 S: 0,005 % o menos,

Ti: 0,005 % o menos, y

O: 0,0015 % o menos,

35 y opcionalmente uno o más de B, W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr y Te en una cantidad de un 0,1 % o menos, estando el resto formado por hierro e impurezas inevitables, de las cuales P está limitado a un 0,03 % o menos.

2. Un cigüeñal de tipo sólido producido mediante forja en caliente de un lingote de acero para forja de acuerdo con la reivindicación 1.

FIG. 1

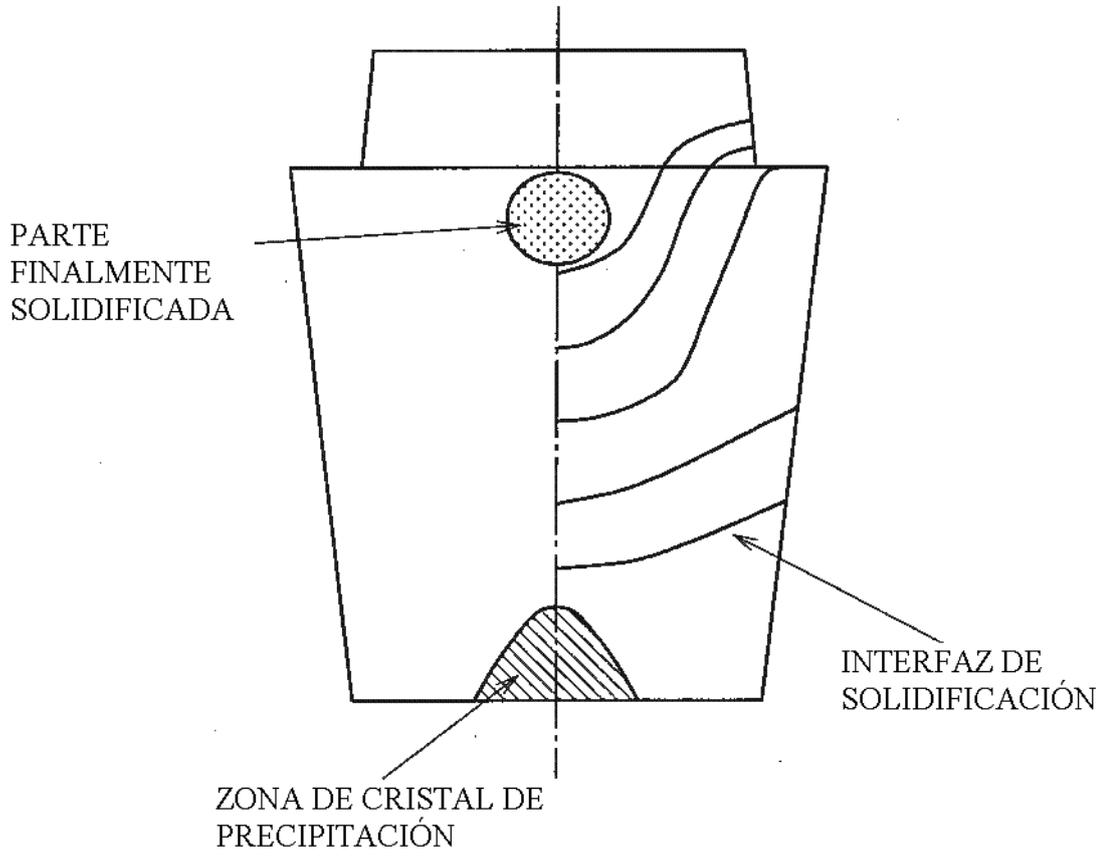


FIG. 2

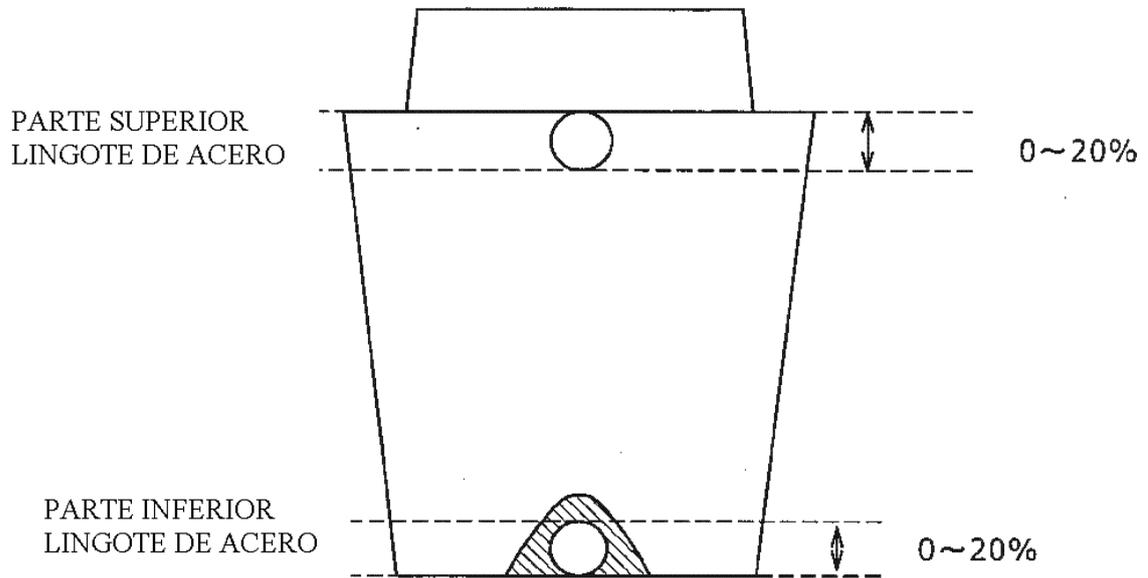
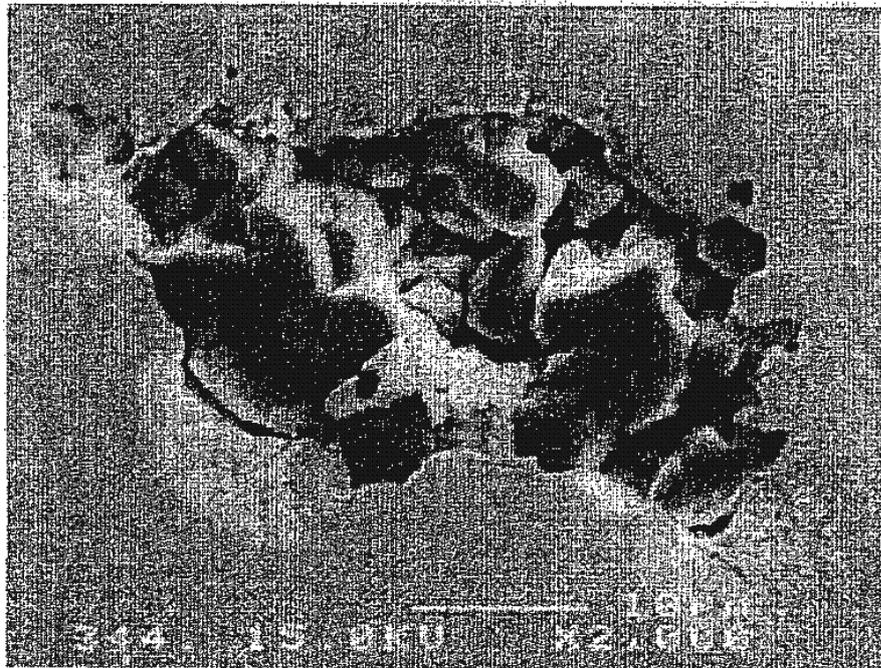
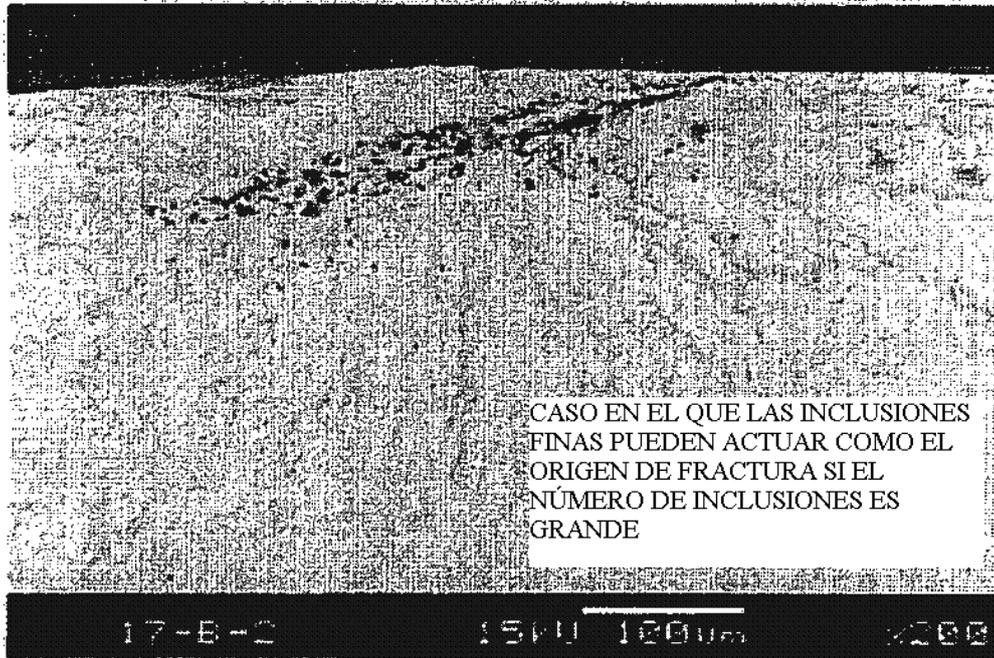


FIG. 3



# FIG. 4



# FIG. 5

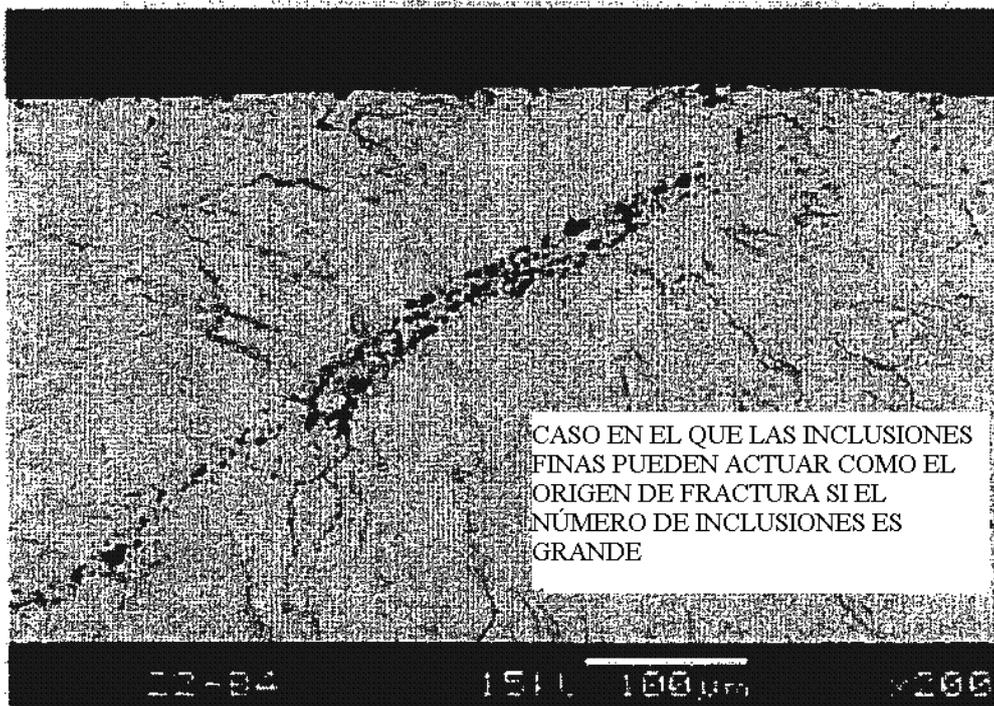


FIG. 6

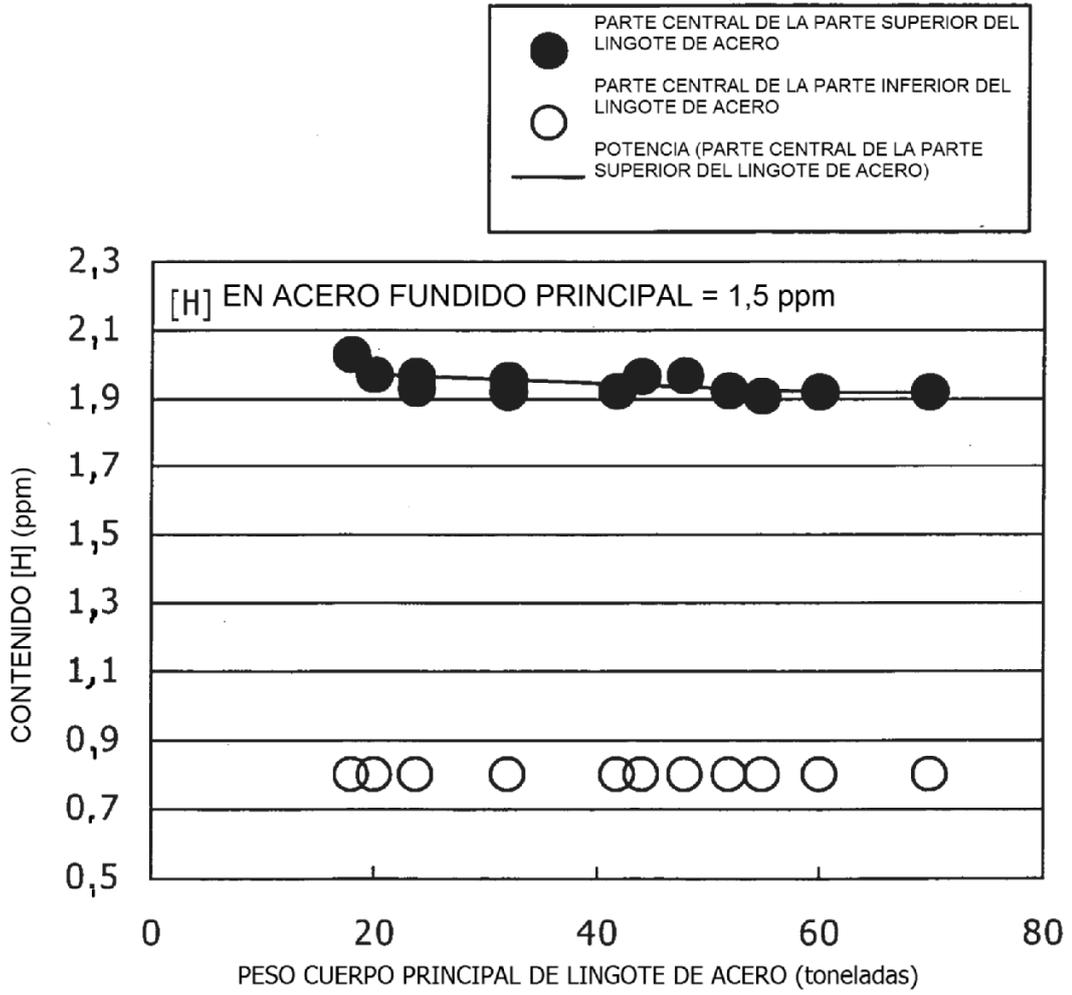


FIG. 7

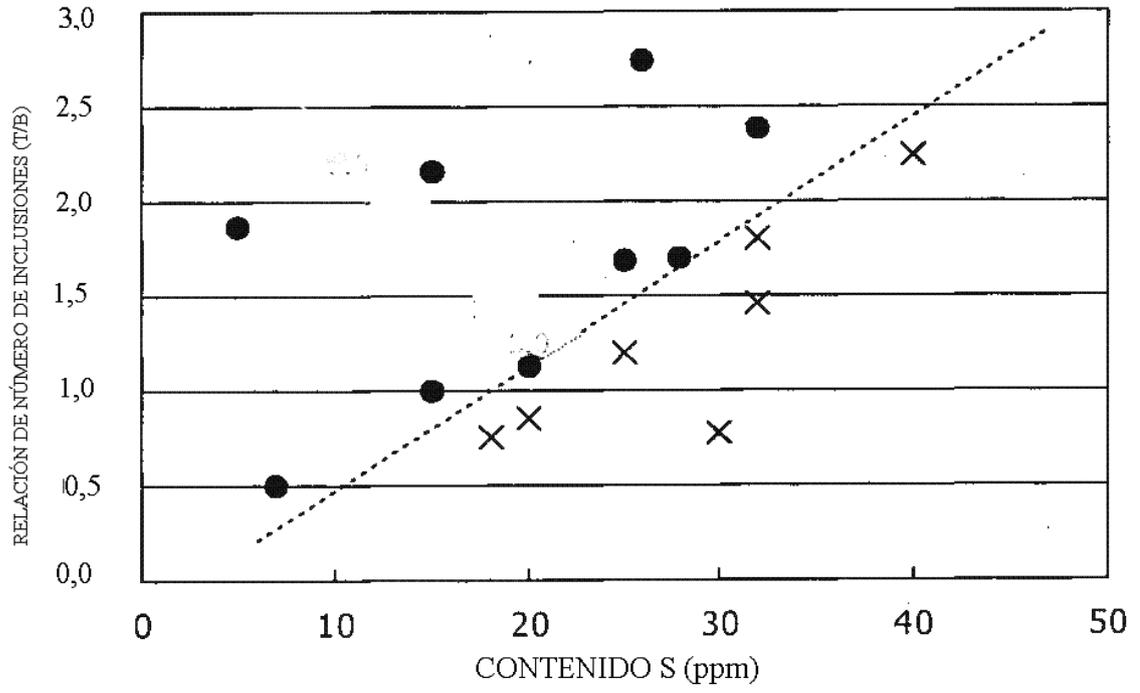
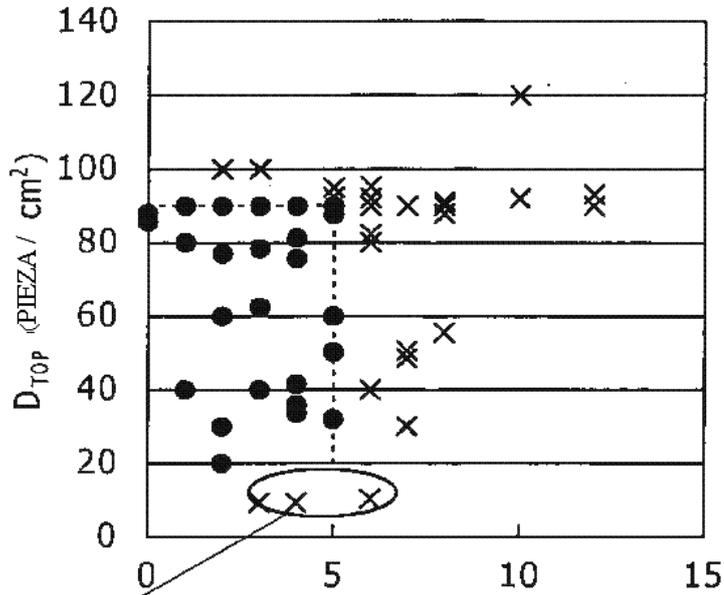


FIG. 8

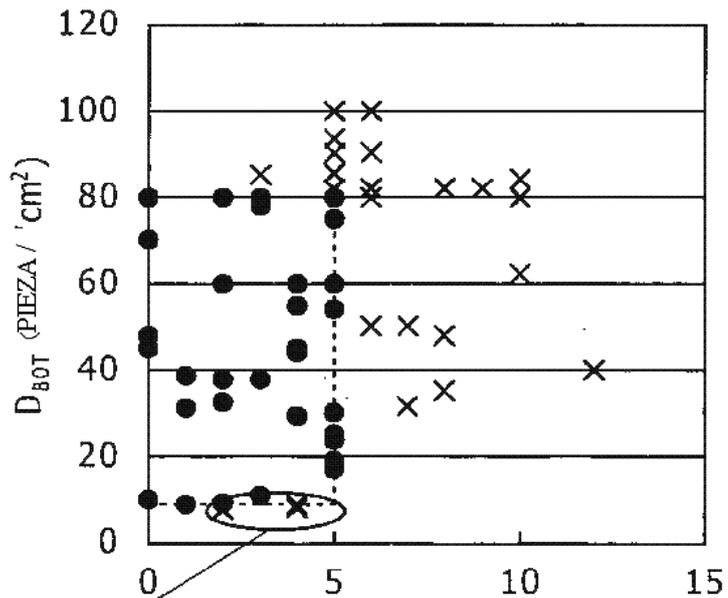
(a)



AGRIETAMIENTO  
POR HIDRÓGENO

INCLUSIONES DE 40  $\mu\text{m}$  O MÁS (PIEZA /  $\text{cm}^2$ )  
: PARTE SUPERIOR LINGOTE DE ACERO

(b)



AGRIETAMIENTO  
POR HIDRÓGENO

INCLUSIONES DE 40  $\mu\text{m}$  O MÁS (PIEZA /  $\text{cm}^2$ )  
: PARTE INFERIOR LINGOTE ACERO