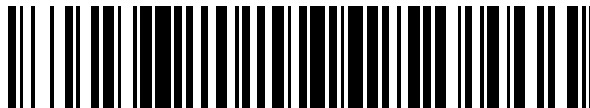


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 522 904**

51 Int. Cl.:

**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)

**C21D 6/00** (2006.01)

**C21D 7/13** (2006.01)

**C21D 9/30** (2006.01)

**F16C 3/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2008 E 08003276 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.10.2014 EP 1978124**

54 Título: **Acero de forja, forjado y cigüeñal**

30 Prioridad:

**05.04.2007 JP 2007099713**

**19.09.2007 JP 2007242860**

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

**19.11.2014**

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:

**ABIKO, TAKASHI;  
DEURA, TETSUSHI;  
NAGAO, MOTOHIRO;  
TOMIOKA, ATSUSHI;  
FUKAYA, SHOGO;  
URUSHIHARA, WATARU y  
FUJITSUNA, NOBUYUKI**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

**ES 2 522 904 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

Acero de forja, forjado y cigüeñal

5 La presente invención se refiere a un acero de forja, a un forjado hecho del acero de forja, y un cigüeñal hecho del acero de forja. Más particularmente, la presente invención se refiere a un acero de forja que tiene un contenido de inclusión de S controlado y un contenido de inclusión de Ti controlado. Los forjados de la presente invención se usan amplia y eficazmente en los campos industriales de máquinas, navíos y generadores de energía. El acero de forja de la presente invención es particularmente adecuado para formar partes que se requiere que tengan alta resistencia a la fatiga, tales como partes giratorias.

10 Se requiere que un forjado de acero hecho mediante forja de un acero de forja, tal como un gran cigüeñal, en concreto, un miembro de transmisión de una máquina de impulsión naval, sea resistente a la fractura por fatiga en condiciones de trabajo exigentes y tenga una excelente característica de resistencia a la fatiga.

15 Se mencionan estudios de la mejora de la característica de resistencia a la fatiga de aceros de baja aleación para formar cigüeñales para motores marinos en "Study of Fatigue Strength of High-Strength Materials for Crankshafts", Jour. of the JIME, Vol. 36, N° 6, pág. 385 a 390 (2001) (Referencia citada 1). En la Referencia citada 1 se menciona que (i) existe la tendencia de que las inclusiones pueden ser fácilmente puntos de comienzo de fractura por fatiga y esta tendencia se vuelve más notable con el aumento de la resistencia de los aceros, (ii) cuanto mayor es el tamaño de las inclusiones, menor es la característica de resistencia a la fatiga, y (iii) la resistencia a la fatiga de los aceros que contienen inclusiones elongadas tiende a ser anisotrópica. En la Referencia citada 1 también se menciona que para mejorar la característica de resistencia a la fatiga de materiales de forja es eficaz esferoidizar las inclusiones y formar las mismas en tamaños pequeños.

20 El acero de forja de alta resistencia mencionado en el documento de Patente JP-A 2004-211206 (Referencia citada 2) se puede fabricar con un bajo coste manteniendo en bajas cantidades elementos costosos de la aleación (especialmente Ni), tiene una alta resistencia y es un material útil para formar grandes cigüeñales. La resistencia a la fatiga es una propiedad importante de los aceros para formar cigüeñales y, como se ha mencionado anteriormente, las inclusiones son puntos de partida de fracturas por fatiga. Dado que la composición y la forma de las inclusiones no se pueden controlar únicamente mediante los componentes principales de un acero, el acero no puede tener una proporción límite de resistencia satisfactoria expresada por: (resistencia a la fatiga (MPa))/(resistencia a la tracción (MPa)).

25 En los documentos de Patente JP-A H7-188853 (Referencia citada 3) y JP-A H7-238342 (Referencia citada 4) se mencionan técnicas para controlar la forma de las inclusiones contenidas en los aceros. En las Referencias citadas 3 y 4, se menciona la generación de inclusiones de óxido de coagulación dura, tales como MgO y MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Las Referencias citadas 3 y 4 dilucidan la supresión de la capacidad de expansión de las inclusiones y la reducción de la anisotropía de la resistencia mecánica convirtiendo parte del MnS, es decir, un sulfuro, en (Mn·Mg)S.

30 En el documento de Patente JP-A 2000-87179 (Referencia citada 5) se divulga un acero para uso estructural en maquinaria que es superior en maquinabilidad a los aceros de corte libre. Se añaden al acero sulfuros que incluyen MnS, CaS, MgS, (Ca, Mn)S, y (Ca, Mg, Mn)S para mejorar la maquinabilidad del acero. La Referencia citada 5 dilucida que se puede suprimir la anisotropía de las propiedades mecánicas y el acero es superior en maquinabilidad a aceros de corte libre cuando la forma de los sulfuros se controla por adición de REM, Ca y Mg al acero. Sin embargo, esta técnica para controlar la forma de las inclusiones no está destinada a forjados que se usan en condiciones de trabajo exigentes, tales como miembros de transmisión de máquinas de impulsión navales.

35 Para aumentar la característica de resistencia a la fatiga del acero, se divulga una técnica para esferoidizar y micronizar inclusiones en el documento de Patente JP-A 2004-225128 (Referencia citada 6). Esta técnica genera óxidos de coagulación dura que pueden ser núcleos de inclusiones, tales como MgO y MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y precipita (Mg, Ca, Mn)S, que presenta mayor dificultad para la deformación que MnS, alrededor de los óxidos para esferoidizar y micronizar las inclusiones. Sin embargo, la Referencia citada 6 especifica una concentración de S de 10 ppm y no especifica concentración de Ti. Aunque esta técnica pretende micronizar inclusiones, se agregan S y Ti en el acero mientras que el acero solidifica y las concentraciones de S y de Ti aumentan si las concentraciones de S y de Ti son mayores de un valor fijo. Por lo tanto, se generan inclusiones gruesas de S y Ti que deterioran la característica de resistencia a la fatiga del acero.

40 Una técnica divulgada en el documento de Patente JP-A S62-63651 (Referencia citada 7) proporciona un acero que tiene una vida nominal y una vida promedio mayores que las de los aceros convencionales limitando el contenido de O y el contenido de Ti a un 0,0008 % o inferior y un 0,0025 % o inferior, respectivamente, reduciendo los elementos que son perjudiciales para la vida útil, maquinabilidad y forjabilidad en frío en el mayor grado posible, y reduciendo el contenido de S a un 0,008 % o inferior que es inferior al de los aceros convencionales.

45 El agrietamiento por hidrógeno puede surgir fácilmente a medida que aumenta la limpieza y la resistencia a la fatiga. Se han tomado medidas tanto respecto a las técnicas de refinado de acero, como respecto a la composición y la

estructura de los aceros para enfrentarse al problema. Las medidas respecto a las técnicas de refinado del acero especifican un límite superior del contenido de hidrógeno de un acero fundido durante el refinado, y someten el acero fundido a un proceso de deshidrogenación cuando el contenido de hidrógeno del acero excede el límite superior. Estas medidas se aplican al trabajo de refinado práctico.

5 Un método de retirada de inclusiones propuesto en el documento de Patente JP-A 2003-183722 (Referencia citada 8) reduce las inclusiones por refinado secundario, y retira las inclusiones haciendo circular el acero fundido entre la cuchara de colada y el tanque de desgasificación durante el proceso de desgasificación al vacío RH.

10 Un método que mejora la resistencia al agrietamiento por hidrógeno propuesto en el documento de Patente JP-A 2003-268438 (Referencia citada 9) evita la concentración de hidrógeno aumentando el contenido de S de un acero para producir una inclusión de MnS en el acero.

15 El documento de Patente JP-A 2006-336092 (Referencia citada 10) aumenta el contenido de Ti, Zr, Hf y Nb de un acero y especifica la densidad (que significa la densidad de impurezas en número de impurezas por unidad de área, denominada en lo sucesivo en el presente documento densidad numérica) y la circularidad de las inclusiones de diámetros no inferiores a 20  $\mu\text{m}$ , y la densidad numérica de las inclusiones de diámetros entre el 1 y 10  $\mu\text{m}$ . La concentración de hidrógeno se evita por adición de compuestos de Ti, Zr, Hf y Nb al acero para mejorar la resistencia al agrietamiento por hidrógeno.

20 El efecto del proceso de deshidrogenación en la reducción de hidrógeno está limitado por el tiempo y el coste necesarios para el proceso de deshidrogenación. Por lo general, la fabricación de acero se controla para limitar el contenido de hidrógeno del acero a valores en el orden de una a varias partes por millón. Sin embargo, el agrietamiento por hidrógeno no se puede prevenir completamente limitando el contenido de hidrógeno por debajo de tal nivel debido a que una cantidad muy pequeña de hidrógeno puede causar agrietamiento por hidrógeno. El método que aumenta el contenido de S del acero y el método que aumenta el contenido de Ti, Zr, Hf y Nb del acero puede mejorar indudablemente la resistencia al agrietamiento por hidrógeno, y el último método puede mantener la resistencia a la fatiga especificando el límite superior de la densidad numérica de inclusiones de diámetros no inferiores a 20  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, el aumento en los contenidos tiende a perjudicar la limpieza, propiedades mecánicas y resistencia a la fatiga del acero, e incluso las inclusiones menores de 20  $\mu\text{m}$  pueden causar fracturas por fatiga. Por lo tanto, el método no puede cumplir con las exigencias para una mayor limpieza y una mayor resistencia a la fatiga.

35 Los métodos de supresión de la fragilidad producida por hidrógeno empleados en el campo de la fabricación de acero laminado en frío evitan la entrada de hidrógeno en el acero debida a un factor externo, tal como la corrosión, o evitan la difusión de hidrógeno usando nitruro de carbono precipitado por templado. El comportamiento del hidrógeno durante la supresión de la fragilidad producida por hidrógeno mediante estos métodos es diferente que el del hidrógeno durante el enfriamiento o durante el laminado natural a temperatura ambiente en el que el agrietamiento por hidrógeno se desarrolla en un corto tiempo que es menor que el tiempo en el que se desarrolla la corrosión.

45 Algunos motores diesel navales y motores diesel para generadores de energía de impulsión se proporcionan con un cigüeñal integral y los demás se proporcionan con un cigüeñal ensamblado. Los motores diesel de pequeño y medio tamaño se proporcionan con un cigüeñal integral. Un cigüeñal integral se fabrica mediante un método de forja RR, un método de forja TR o un método de presión multieje. El método de forja RR, es decir, un método conocido generalmente para fabricar cigüeñales mediante forja de flujo de grano continuo (CGF), es un método de forja que forma el apoyo de bancada, la muñequilla y los brazos del cigüeñal para un cilindro en un ciclo de forja. La resistencia a la fatiga es una de las propiedades cruciales que se requieren en un material que forma el cigüeñal integral. La tensión se concentra en el filete en la junta del brazo del cigüeñal y el apoyo de bancada cuando el cigüeñal está en operación práctica. Por lo tanto, se requiere que el filete tenga una alta resistencia a la fatiga.

50 El filete está forjado con una alta relación de mecanizado y por lo tanto las inclusiones contenidas en el acero forjado que forman el filete están altamente deformadas. Incluso si las inclusiones contenidas en el acero se esferoidizan como se menciona en las Referencias citadas 4 y 6, la expansión de las inclusiones mediante el forjado RR afectará adversamente a la resistencia a la fatiga del acero. Cuando la densidad numérica de inclusiones es elevada, las inclusiones se condensarán en grupos de inclusiones de alta densidad, y el área eficaz de las inclusiones aumenta cuando el acero se comprime a una alta relación de mecanizado incluso si las inclusiones se esferoidizan en formas pequeñas, y los grupos de inclusiones afectarán adversamente a la resistencia a la fatiga del acero. Por lo tanto, la resistencia a la fatiga del acero será insuficiente.

60 Las técnicas propuestas en las referencias citadas, sin embargo, no pueden lograr sucesivamente proporcionar un acero forjado apenas objeto de fractura en condiciones de trabajo exigentes, tener una característica de resistencia a la fatiga satisfactoria, y una resistencia al agrietamiento por hidrógeno suficientemente alta. Se describen otras técnicas para mejorar las características de los aceros en los documentos de Patente EP-A-1 420 078, US 5.855.846, US 5.919.415 o JP-A-2000-096185.

65 Por lo tanto, es un primer objeto de la presente invención proporcionar un acero forjado excelente en característica

de resistencia a la fatiga. Un segundo objeto de la presente invención es proporcionar un acero forjado que contiene la menor cantidad necesaria de inclusiones, y es excelente en resistencia al agrietamiento por hidrógeno.

5 Los inventores de la presente invención realizaron estudios para solucionar los problemas anteriores y descubrieron que se puede obtener un acero forjado que tiene una alta resistencia a la fatiga y una alta relación de límite de resistencia limitando las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión de S que tienen una longitud superior a 5  $\mu\text{m}$  y de las partículas de inclusión de Ti que tienen una longitud superior a 5  $\mu\text{m}$  a un número fijo o inferior.

10 También se descubrió que el acero forjado es excelente en resistencia al agrietamiento por hidrógeno cuando las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud y las partículas de inclusión que contienen Ti entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud no son inferiores a un valor fijo.

15 Un acero forjado de acuerdo con un aspecto de la presente invención consiste en un 0,15 a un 0,75 % en masa de C, de un 0,1 a un 0,6 % en masa de Si, de un 0,3 a un 1,4 % en masa de Mn, de un 0,1 a un 2 % en masa de Ni, de un 0,5 a un 2,5 % en masa de Cr, de un 0,1 a un 0,5 % en masa de Mo, de un 0,01 a un 0,2 % en masa de V, de un 0,015 a un 0,04 % en masa de Al, de un 0,0002 a un 0,002 % en masa de S, de un 0,0002 a un 0,003 % en masa de Ti, y opcionalmente uno o más de Ca, B, W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr y Te, en una cantidad total de un 0,1 % en masa o inferior, y el resto Fe e impurezas inevitables; donde las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior, y las partículas de inclusión que contienen Ti que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior entre las partículas de inclusión superiores a 5  $\mu\text{m}$  de longitud presentes en un área de observación de una sección transversal del acero forjado son 100 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, y 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, respectivamente, y donde las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior, y las partículas de inclusión que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa entre las partículas de inclusión entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud presentes en la sección transversal del acero forjado es 10 partículas/cm<sup>2</sup> o superior y 5 partículas/cm<sup>2</sup> o superior, respectivamente.

20 El acero forjado se usa preferentemente para fabricar un cigüeñal.

30 El cigüeñal puede ser tal que tiene apoyos de bancada de un diámetro de 200 mm o superior, y se puede usar como componente de un motor diesel para generación de energía o para un navío.

35 De acuerdo con el aspecto, cuando las dos densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S superiores a 5  $\mu\text{m}$  de longitud y de las inclusiones que contienen Ti superiores a 5  $\mu\text{m}$  de longitud presentes en el área de observación de la sección transversal del acero forjado se mantienen en los valores predeterminados o inferiores, respectivamente, el acero forjado es apenas objeto de fractura en condiciones de trabajo exigentes, excelente en característica de resistencia a la fatiga, y satisfactorio en la relación de límite de resistencia expresada por: (resistencia a la fatiga (MPa))/(resistencia a la tracción (MPa)).

40 El acero forjado es excelente en resistencia al agrietamiento por hidrógeno cuando las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud y las inclusiones que contienen Ti entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud no son inferiores a un valor fijo.

45 El objetivo anterior y otros objetivos, características y ventajas de la presente invención serán más evidentes a partir de la siguiente descripción tomada junto con las figuras anexas, en las que:

la Figura 1A es una vista frontal de una barra redonda forjada mediante una prensa de forja;

la Figura 1B es una elevación lateral de la barra redonda mostrada en la Figura 1A;

la Figura 2A es una vista frontal de una barra redonda forjada mediante una prensa de forja;

la Figura 2B es una elevación lateral de la barra redonda mostrada en la Figura 2A;

50 la Figura 3 es una elevación frontal de un aparato de ensayo para sumergir una especie en una solución acuosa;

la Figura 4A es una vista frontal de un cigüeñal; y

la Figura 4B es una elevación lateral del cigüeñal mostrado en la Figura 4A.

55 A continuación se describirán aceros forjados en realizaciones preferentes de la presente invención.

Los inventores de la presente invención realizaron estudios, desde todos los ángulos, y de todas las clases, tamaños y densidades de inclusiones contenidas en aceros forjados con un primer objetivo de proporcionar forjados que tuvieran una característica de resistencia a la fatiga mejorada para usarse en un ambiente exigente, y con un segundo objetivo de mejorar la resistencia al agrietamiento por hidrógeno de los forjados.

60 Se descubrió mediante los estudios que, a diferencia de la fractura en un forjado formado por un proceso de colada continua, la fractura en un gran forjado formado mediante forja en lingote: no comienza a partir de inclusiones finas de tamaño primario y comienza a partir de inclusiones gruesas, en concreto, agregados de inclusiones, formados por la aglomeración de inclusiones finas.

65

Las inclusiones principales presentes en la superficie de una fractura son inclusiones gruesas que contienen S e inclusiones gruesas que contienen Ti. Se descubrió que la degradación de la característica de resistencia a la fatiga está causada especialmente por las inclusiones que contienen S y que contienen Ti.

5 Los lingotes preparados por colada, en comparación con los preparados por colada continua, solidifican con una baja velocidad de solidificación. Por lo tanto, las inclusiones se expulsan desde las interfases de solidificación a la fase líquida durante la solidificación. En consecuencia, las inclusiones se pueden aglomerar fácilmente en altas densidades durante el proceso de solidificación, aumenta la posibilidad de que las inclusiones de tamaño primario se aglomeren y, en consecuencia, se puedan formar fácilmente inclusiones gruesas.

10 El S y el Ti se concentran por segregación durante la solidificación y, en consecuencia, cristalizan y precipitan inclusiones de S y Ti gruesas, que no se encontrarían en el acero fundido.

15 Por lo tanto, se necesita reducir la densidad numérica de las partículas de inclusión y se necesita que las inclusiones se micronicen para proporcionar el acero con la resistencia a la fatiga requerida de los aceros que forman los cigüeñales y similares. Es particularmente importante reducir las inclusiones que precipitan durante la solidificación.

20 Se considera que se puede reducir la probabilidad de formación de agregados de inclusiones, se puede reducir el tamaño de las partículas de inclusión, y se puede asegurar una alta resistencia a la fatiga requerida por los forjados incluidos en los cigüeñales cuando se reducen las inclusiones que precipitan durante la solidificación.

**Densidad numérica de las inclusiones que contienen S de longitud superior a 5 µm: 100 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior**

25 **Densidad numérica de las inclusiones que contienen Ti de longitud superior a 5 µm: 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior**

Los inventores de la presente invención descubrieron a través de estudios que un acero forjado tiene una alta relación de límite de resistencia cuando las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S que contienen S en un 20 % en masa o superior y las partículas de inclusión que contienen Ti que contienen Ti en un 50 % en masa o superior entre las inclusiones superiores a 5 µm de longitud presentes en un área de observación en una sección transversal del acero de forja son 100 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, y 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, respectivamente. Preferentemente, en la densidad numérica de las inclusiones que contienen S que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior es 50 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, más deseablemente, 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior. Preferentemente, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior es 10 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, más deseablemente, 5 partículas/cm<sup>2</sup>.

40 A continuación se describirá el significado de las inclusiones que contienen S que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior y las inclusiones que contienen Ti que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior mencionadas en la presente memoria descriptiva.

45 Las inclusiones presentes en un acero de forja incluyen una inclusión de sulfuro de un elemento individual o de una pluralidad de elementos, una inclusión de óxido de un elemento individual o de una pluralidad de elementos, una inclusión de nitruro de un elemento individual o de una pluralidad de elementos, e inclusiones de compuestos de algunas de estas inclusiones, tales como una mezcla de un sulfuro y un óxido. Los elementos componentes principales de estas inclusiones son Al, S, Mn, Mg, Ti, Si, y Ca. El contenido de S y de Ti se define mediante las Expresiones (1) y (2), respectivamente.

50 
$$\text{Contenido de S} = \left\{ \frac{[S]}{([Al] + [S] + [Mn] + [Mg] + [Ti] + [Si] + [Ca])} \right\} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Contenido de Ti} = \left\{ \frac{[Ti]}{([Al] + [S] + [Mn] + [Mg] + [Ti] + [Si] + [Ca])} \right\} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

55 donde los elementos entre corchetes indican los contenidos totales del elemento en porcentaje en masa de las inclusiones.

De acuerdo con una definición que se usa en la presente memoria descriptiva, una inclusión que tiene un contenido de S de un 20 % en masa o superior calculada usando la Expresión (1) se denomina inclusión que contiene S, y una inclusión que tiene un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior calculada usando la Expresión (2) se denomina inclusión que contiene Ti.

65 El significado de las respectivas densidades de 100 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior y 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior de las inclusiones que contienen S de más de 5 µm de longitud que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior, y de las inclusiones que contienen Ti de más de 5 µm de longitud que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior entre las inclusiones de diversas formas y composiciones presentes en una sección transversal

de un acero forjado se dilucidan basándose en la definición.

**Densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S de longitud entre 1 y 5  $\mu\text{m}$ : 10 partículas/cm<sup>2</sup> o superior**

5

**Densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti de longitud entre 1 y 5  $\mu\text{m}$ : 5 partículas/cm<sup>2</sup> o superior**

10 Las inclusiones que contienen S en un acero tienen formas de baja circularidad. Las inclusiones que contienen S largas y grandes pueden ser puntos de comienzo de fractura y ejercer una influencia perjudicial en el acero. Las inclusiones finas que contienen S de longitud entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  forman campos de tensión en el acero, y son eficaces en mejorar la resistencia al agrietamiento por hidrógeno del acero por captura y retención del hidrógeno contenido en un contenido de hidrógeno que excede el límite de solubilidad del acero.

15 Las inclusiones que contienen Ti se dispersan en el acero en partículas finas de TiN, TiC, Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub> y similares. Las inclusiones que contienen Ti tienen un efecto significativo en la mejora de la resistencia al agrietamiento por hidrógeno del acero ocluyendo y manteniendo el exceso de hidrógeno contenido en el acero en un contenido de hidrógeno que excede el límite de solubilidad. La energía de enlace químico mediante la que las inclusiones que contienen Ti ocluyen el hidrógeno es muy alta. Tal enlace químico de alta energía es eficaz en la supresión de la difusión de hidrógeno que surge durante un proceso de enfriamiento del acero a una temperatura mayor.

20 Las inclusiones finas que contienen S y que contienen Ti de longitud entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  entre las inclusiones son particularmente excelentes en un efecto preventivo de agrietamiento por hidrógeno.

25 Los inventores de la presente invención descubrieron a través de estudios que un acero tiene una alta resistencia al agrietamiento por hidrógeno cuando las respectivas densidades de las partículas de inclusión que contienen S que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior, y de las partículas de inclusión que contienen Ti que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior entre las inclusiones de longitud entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  presentes en una sección transversal del acero son 10 partículas/cm<sup>2</sup> y 5 partículas/cm<sup>2</sup>. Preferentemente, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S que tienen un contenido de S de un 20 % en masa o superior es 20 partículas/cm<sup>2</sup> o superior, más deseablemente, 30 partículas/cm<sup>2</sup> o superior. Preferentemente, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa o superior es 10 partículas/cm<sup>2</sup>, más deseablemente, 15 partículas/cm<sup>2</sup> o superior.

35 Con respecto al agrietamiento por hidrógeno, es deseable aumentar las inclusiones que precipitan durante la solidificación añadiendo muchos elementos que formen las inclusiones finas. Sin embargo, es deseable que el lingote contenga los elementos en contenidos que no formen puntos de comienzo de agrietamiento por hidrógeno y no reduzcan la resistencia a la fatiga.

40 **Tamaño y densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S**

El azufre (S) enlaza fácilmente con Mn, Mg, Ca y similares contenidos en un acero para formar inclusiones que contienen S. Si las inclusiones están contenidas en un acero en una alta densidad numérica, las inclusiones se aglomeran en agregados de partículas de inclusión y los aglomerados de partículas de inclusión reducen la resistencia a la fatiga del acero incluso si las inclusiones son finas. La aglomeración de las inclusiones en inclusiones gruesas, en concreto, en agregados de partículas de inclusión gruesas, se puede prevenir reduciendo la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S. El tamaño medio de las inclusiones que contienen S se puede reducir añadiendo Ca que tiene efecto en la esferoidización de las inclusiones que contienen S del acero por aumento de la relación de contenido de inclusiones de CaS que tienen corta longitud. La densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S en el acero es pequeña cuando el contenido de S del acero es bajo.

50 **Tamaño y densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti**

El titanio (Ti) y el N contenidos en un acero enlazan conjuntamente y la mayoría de las inclusiones que contienen Ti contenidas en el acero son nitruros. Por lo tanto, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti se puede reducir al reducir el contenido de N del acero. Cuando se reduce de ese modo la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti, es difícil que se formen inclusiones gruesas que contienen Ti. El contenido de N del acero se puede reducir mediante un proceso de desgasificación al vacío. El nitrógeno contenido en el acero se puede retirar satisfactoriamente mediante un proceso de desgasificación al vacío prolongado.

60 **Inclusiones entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud**

Prácticamente, incluso las inclusiones inferiores a 1  $\mu\text{m}$  de longitud pueden mejorar la resistencia al agrietamiento por hidrógeno. Por lo tanto, es deseable que el acero contenga inclusiones inferiores a 1  $\mu\text{m}$  de longitud en un alto contenido de inclusión. Dado que la distribución característica de las inclusiones de longitud inferior a 1  $\mu\text{m}$  es similar

65

a la de las inclusiones de longitud entre 1 y 5 µm, la propiedad de agrietamiento al hidrógeno se puede estimar satisfactoriamente contando solamente el número de inclusiones entre 1 y 5 µm de longitud en un área de medición unidad. No se cumple con la cuenta de las inclusiones inferiores a 1 µm para facilitar una doble comprobación.

5 Componentes químicos del acero

Como se ha mencionado anteriormente, la presente invención se caracteriza por controlar los respectivos tamaños y densidades de las inclusiones que contienen S y que contienen Ti y no plantea ninguna restricción particular en la composición básica del acero. Sin embargo, el acero de la presente invención cumple la siguiente composición básica de acuerdo con el nivel técnico general de los aceros para proporcionar el acero con la resistencia, tenacidad y característica de resistencia a la fatiga requeridas en los aceros que forman, por ejemplo, cigüeñales.

Contenido de C: de un 0,15 a un 0,75 % en masa

15 El carbono (C) es un elemento eficaz para mejorar la resistencia. El contenido de C de un acero destinado a formar cigüeñales es un 0,15 % en masa o superior, deseablemente, un 0,30 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,34 % en masa o superior para asegurar que el acero tenga la suficiente resistencia para formar cigüeñales. Sin embargo, un contenido excesivo de C reduce la tenacidad de los cigüeñales. Por lo tanto, el contenido de C es un 0,75 % en masa o inferior, deseablemente un 0,6 % en masa o inferior, más deseablemente un 0,5 % en masa o inferior.

Contenido de Si: de un 0,1 a un 0,6 % en masa

25 El silicio (Si) es un elemento que mejora la resistencia. Por lo tanto, el contenido de Si de un acero destinado a formar cigüeñales es un 0,1 % en masa o superior, deseablemente, un 0,15 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,20 % en masa o superior para asegurar que el acero tenga la suficiente resistencia para formar cigüeñales. Sin embargo, un contenido excesivo de Si causar una notable segregación V inversa y hace que sea difícil obtener lingotes limpios. Por lo tanto, el contenido de Si del acero es un 0,6 % en masa o inferior, deseablemente, un 0,35 % en masa o inferior.

Contenido de Mn: de un 0,3 a un 1,4 % en masa

35 El manganeso (Mn) es un elemento eficaz para mejorar tanto la templabilidad como la resistencia. Por lo tanto, el contenido de Mn de un acero es un 0,3 % en masa o superior, deseablemente, un 0,8 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,9 % en masa o superior para asegurar que el acero tenga la suficiente resistencia y una templabilidad satisfactoria. Sin embargo, un contenido excesivo de Mn estimula la segregación V inversa. Por lo tanto, el contenido de Mn del acero es un 1,4 % en masa o inferior, deseablemente, un 1,2 % en masa o inferior, más deseablemente, un 1,1 % en masa o inferior.

40 Contenido de Ni: de un 0,1 a un 2 % en masa

45 El níquel (Ni) es un elemento eficaz para mejorar la tenacidad. Por lo tanto, el contenido de Ni de un acero es un 0,1 % en masa o superior, deseablemente, un 0,2 % en masa o superior. Un contenido excesivo de Ni aumenta el coste del acero. Por lo tanto, el contenido de Ni es un 2 % en masa o inferior, preferentemente, un 1,75 % en masa o inferior.

Contenido de Cr: de un 0,5 a un 2,5 % en masa

50 El cromo (Cr) es un elemento eficaz para mejorar tanto la templabilidad como la tenacidad. Tal característica del Cr se puede exhibir eficazmente cuando el contenido de Cr de un acero es un 0,5 % en masa o superior, deseablemente, un 0,7 % en masa o superior, más deseablemente, un 1,75 % en masa o superior. Un contenido excesivo de Cr estimula la segregación V inversa y hace que sea difícil la fabricación de un acero de alta limpieza. Por lo tanto, el contenido de Cr es un 2,5 % en masa o inferior, deseablemente, un 2,0 % en masa o inferior.

55 Contenido de Mo: de un 0,1 a un 0,5 % en masa

60 El molibdeno (Mo) es un elemento eficaz para mejorar la templabilidad, resistencia y tenacidad. Tal característica del Mo se puede exhibir eficazmente cuando el contenido de Mo de un acero es un 0,1 % en masa o superior, deseablemente, un 0,2 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,25 % en masa o superior. El molibdeno (Mo) tiene un bajo coeficiente de distribución de equilibrio y hace que se produzca fácilmente la microsegregación (segregación normal). Por lo tanto, el contenido de Mo es un 0,5 % en masa o inferior.

Contenido de V: de un 0,01 a un 0,2 % en masa

65 El vanadio (V) es eficaz en endurecimiento por precipitación y refinado de estructura y aumento de resistencia. Por lo tanto, el acero tiene un contenido de V de un 0,01 % en masa o superior para exhibir eficazmente tal característica

del V. Dado que el efecto favorable del V se satura a un cierto contenido de V y un contenido excesivo de V es inútil económicamente, el contenido de V de un acero es un 0,2 % en masa o inferior, deseablemente, un 0,15 % en masa o inferior.

5 Contenido de Al: de un 0,015 a un 0,04 % en masa

El aluminio (Al) sirve eficazmente como elemento desoxidante en los procesos de fabricación de acero, y mejora eficazmente la resistencia al agrietamiento de los aceros. Un acero de la presente invención tiene un contenido de Al de un 0,015 % en masa o superior, preferentemente, un 0,02 % en masa o superior. Cuando el contenido de Al de un acero es excesivamente alto, se produce  $Al_2O_3$  que perjudica la característica de resistencia a la fatiga. Por lo tanto, el contenido de Al es un 0,04 % en masa o inferior, preferentemente, un 0,03 % en masa o inferior.

10

Contenido de S: de un 0,0002 a un 0,002 % en masa

15 El azufre (S) puede formar fácilmente inclusiones gruesas en un acero forjado y reduce la resistencia a la fatiga del acero forjado. El contenido de S del acero forjado es un 0,002 % en masa o inferior, deseablemente, un 0,0015 % en masa o inferior, más deseablemente, un 0,001 % en masa o inferior.

20 Cuando un acero forjado contiene inclusiones finas que contienen S en una densidad numérica fija o superior, se forman numerosos campos de tensión en el acero forjado, se puede capturar fácilmente el exceso de hidrógeno que excede el límite de solubilidad contenido en el acero forjado, y mejora la resistencia al agrietamiento por hidrógeno del acero forjado. Para hacer que el acero forjado contenga inclusiones que contienen S en una densidad numérica apropiada, el contenido de S del acero forjado es un 0,0002 % en masa o superior, deseablemente, un 0,0004 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,0006 % en masa o superior.

25

El contenido de S se puede ajustar controlando la composición de escoria para la fabricación del lingote. Más concretamente, el contenido de S de un acero se puede reducir aumentando la proporción del contenido de CaO de la escoria con respecto al contenido de  $SiO_2$  de la escoria, en concreto, la relación  $CaO/SiO_2$  que se denomina relación C/S. El contenido de S de un acero se puede reducir mediante medios complementarios que aumentan la relación del contenido de CaO con respecto al contenido de  $Al_2O_3$ , en concreto, la relación  $CaO/Al_2O_3$  que se denomina relación C/A. El contenido de S se puede aumentar ajustando la composición de la escoria de modo que la relación C/S y la relación C/A sean bajas.

30

Contenido de Ti: de un 0,0002 a un 0,003 % en masa

35

El titanio (Ti) forman partículas gruesas de nitruro en un acero forjado. Las partículas gruesas de nitruro reducen la resistencia a la fatiga del acero forjado. El contenido de Ti del acero forjado es un 0,003 % en masa o inferior, deseablemente, un 0,0025 % en masa o inferior, más deseablemente, un 0,002 % en masa o inferior.

40 Las inclusiones finas que contienen Ti se dispersan en un acero forjado en partículas finas de TiN, TiC, y  $Ti_4C_2S_2$ . Las inclusiones que contienen Ti capturan y mantienen el exceso de hidrógeno contenido en un contenido de hidrógeno que excede el límite de solubilidad en el acero forjado. De ese modo, las inclusiones que contienen Ti tienen un efecto significativo en la mejora de la resistencia al agrietamiento por hidrógeno del acero forjado. Para asegurar que el acero forjado contiene las inclusiones que contienen Ti en un contenido apropiado, el contenido de Ti del acero forjado es un 0,0002 % en masa o superior, deseablemente, un 0,0004 % en masa o superior, más deseablemente, un 0,0006 % en masa o superior.

45

El contenido de Ti se puede ajustar mezclando apropiadamente una aleación de baja calidad que tiene un alto contenido de Ti, y una aleación de alta calidad que tiene un bajo contenido de Ti en una relación de mezcla apropiada.

50

Los elementos anteriores son componentes básicos del acero forjado de la presente invención, y el balance se realiza con Fe e impurezas inevitables.

55 Otros elementos que se pueden añadir positivamente al acero forjado son, por ejemplo, Ca capaz de suprimir la elongación de sulfuros, B que tiene un efecto de mejora de la templeabilidad, y W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr, y Te que tienen efectos de endurecimiento de solución sólida y endurecimiento por precipitación. Estos elementos se pueden añadir individualmente al acero forjado o algunos de estos elementos se pueden añadir en combinación al acero forjado, en una cantidad total de un 0,1 % en masa o inferior.

60

No existe ninguna restricción particular en el método de fabricación del forjado de la fabricación del forjado de la presente invención. Por ejemplo, el forjado se puede fabricar mediante un método de fabricación de forjado que incluye las etapas de: fundir un acero de una composición predeterminada en un horno eléctrico, retirar las impurezas que incluyen S y los componentes gaseosos que incluyen O mediante refinado al vacío o similar, preparar un lingote, procesar el lingote calentado a aproximadamente 1200 °C mediante forja bruta para obtener una pieza de trabajo, inspeccionar la pieza de trabajo mediante inspección intermedia, forjar la pieza de trabajo inspeccionada

65



y calentada para obtener un forjado semiacabado, someter el forjado semiacabado a un tratamiento térmico a aproximadamente 870 °C para homogeneizar y detener el endurecimiento, y mecanizar el acabado del forjado semiacabado para obtener un forjado acabado.

## 5 Ejemplos

La presente invención se describirá concretamente en términos de sus ejemplos.

### Ejemplo 1

10

#### Fabricación del acero de ensayo

15

Los aceros de ensayo que tienen, respectivamente, las composiciones químicas que se muestran en la Tabla 1 se fundieron mediante un sistema de fabricación de acero que incluye un horno de arco, se prepararon lingotes de estos aceros, y se forjaron los lingotes para obtener forjados de acero.

20

La composición química de cada forjado de acero se ajustó añadiendo Al y Ca al acero fundido. El acero fundido se coló en un molde de clase 10 a 90 t, que tiene de 2 m a 4 m de altura total, para obtener un lingote. El lingote retirado del molde y calentado hasta aproximadamente 1200 °C se sometió a un proceso de forja en caliente para acabar el lingote en un forjado de acero de un diámetro entre 150 y 700 mm. El proceso de forja en caliente estiró el lingote para obtener una barra mediante presión, y se dio forma a la barra para obtener una barra redonda forjada mediante una herramienta de conformado especial.

25

Los datos medidos de los componentes de los forjados de acero, las composiciones y tamaños de las inclusiones, y las relaciones del límite de resistencia de los forjados de acero ((resistencia a la fatiga) / (resistencia a la tracción)) se muestran en la Tabla 1. En la columna del contenido de Ca de la Tabla 1, los guiones "-" indican un contenido de Ca inferior al límite de detección del contenido de Ca de un 0,0005 % en masa o inferior. Dado que el Ca es apenas soluble en los aceros, el Ca contenido en los aceros se puede detectar cuando el contenido de Ca de los aceros está entre un 5 y un 10 % en masa.

30

Tabla 1

Muestra Nº	Composición (porcentaje en masa)											C/A	Inclusión (superior a 5 µm)		Relación del límite de resistencia	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ca	S	Ti		que contiene S	que contiene Ti	OR	1/3R
1	0,60	0,22	1,00	0,42	2,05	0,35	0,08	0,035	-	0,0010	0,0011	40	6	0,504	0,504	
2	0,70	0,19	0,80	0,75	1,15	0,28	0,12	0,025	-	0,0010	0,0016	24	1	0,487	0,518	
3	0,43	0,17	0,77	0,74	1,12	0,26	0,10	0,026	-	0,0010	0,0009	20	0	0,476	0,523	
4	0,30	0,22	0,91	0,40	2,04	0,30	0,05	0,039	-	0,0009	0,0005	16	0	0,479	0,492	
5	0,45	0,36	0,69	1,70	1,75	0,32	0,19	0,026	-	0,0006	0,0012	31	2	0,471	0,490	
6	0,25	0,29	0,55	1,62	1,55	0,21	0,15	0,026	-	0,0008	0,0009	58	0	0,472	0,483	
7	0,31	0,23	1,05	0,25	1,65	0,29	0,06	0,025	0,0005	0,0012	0,0008	55	5	0,461	0,466	
8	0,40	0,26	0,85	0,31	2,05	0,28	0,10	0,022	-	0,0018	0,0016	32	20	0,458	0,460	
9	0,45	0,20	0,82	0,35	1,75	0,26	0,09	0,022	-	0,0004	0,0025	21	27	0,452	0,462	
10	0,66	0,29	0,91	0,21	1,99	0,33	0,09	0,018	-	0,0008	0,0022	28	33	0,440	0,442	
11	0,65	0,21	0,60	0,28	1,85	0,35	0,07	0,021	-	0,0018	0,0014	105	8	0,445	0,450	
12	0,32	0,30	1,00	0,21	1,96	0,25	0,05	0,017	-	0,0020	0,0031	89	35	0,427	0,430	
13	0,32	0,25	1,10	0,22	2,01	0,25	0,10	0,033	-	0,0003	0,0051	30	41	0,432	0,442	
14	0,61	0,30	0,73	1,72	1,83	0,35	0,20	0,020	-	0,0050	0,0009	273	12	0,416	0,433	
15	0,30	0,25	0,56	1,58	1,56	0,26	0,15	0,018	-	0,0023	0,0005	113	0	0,429	0,430	
16	0,58	0,37	1,08	0,23	2,23	0,32	0,06	0,021	-	0,0050	0,0058	208	44	0,401	0,404	
17	0,60	0,36	1,12	0,22	2,15	0,32	0,07	0,020	-	0,0030	0,0054	240	40	0,403	0,410	

Evaluación de forjados de acero. Determinación de las composiciones de las inclusiones mediante EDS

Se tomaron como muestras ejemplares de las partes centrales de los extremos de los forjados de acero de un diámetro entre 150 y 700 mm. Cada muestra estaba embebida en una resina, y se pulió una superficie transversal de la muestra para formar una microsección. La superficie transversal de la muestra se observó con un microscopio de barrido electrónico con un aumento entre 100x y 200x. Se examinaron mediante un EPMA las respectivas composiciones de las inclusiones superiores a 5 µm de longitud, y las partículas de inclusión entre 1 y 5 µm de longitud presentes en un área de observación de 10 mm<sup>2</sup>. Más específicamente, el centro del grano de la inclusión se analizó cuantitativamente mediante un EDS (espectrómetro de rayos X de dispersión de energía) (XM-Z0043T, Nippon Denshi Inc.) adjunto a un EPMA (JXA-8900RL, Nippon Denshi Inc.). Las condiciones de irradiación del haz de electrones fueron una tensión de aceleración de 15 kV, una intensidad de corriente del haz de 1,70 x 10<sup>-9</sup> A, y un diámetro de haz de 1 µm. El tiempo de análisis (duración de la irradiación con el haz) para un punto fue de 10 s y el tiempo muerto estándar fue de un 20 % en masa.

Se clasificaron las respectivas composiciones de las inclusiones determinadas de ese modo. Se calcularon los respectivos números totales de las inclusiones que contenían S y de las inclusiones que contenían Ti presentes en un área unidad.

Resistencia a la tracción

Se cortaron dos ejemplares de ensayo para la resistencia a la tracción de 6 mm de diámetro y 30 mm de longitud libre de una parte OR (la parte central) y una parte R/3, respectivamente. Los ejemplares de ensayo para la resistencia a la tracción se sometieron a un ensayo de tracción a una temperatura ordinaria de acuerdo con Z2204 y Z2241, JIS.

La Figura 1A es una vista frontal de una barrera redonda forjada, en concreto, un forjado de acero, y la Figura 1B es una elevación lateral de la barrera redonda forjada. En las Figuras 1A y 1B, la letra "R" indica el radio de la barra redonda, "OR" indica la parte central de la barra redonda, "R/3" indica una parte de la barra redonda a una distancia de R/3 del eje central de la barra redonda, y R (3R/3) indica una parte de la superficie de la barra redonda. La parte R/3 de la barra redonda se usó como ejemplar de ensayo para la resistencia a la tracción debido a que la parte R/3 de la barra redonda corresponde a un filete en un cigüeñal integral formado mediante procesamiento de la barra redonda como se muestra en la Figura 4.

Como se muestra en Figura 1B, el ejemplar de ensayo para la resistencia a la tracción, en concreto, la parte R/3 de la barra redonda, se inclinó un ángulo de 45° con respecto al eje de la barra redonda debido a que la fuerza principal que actúa sobre el filete del cigüeñal en operación está en una dirección a 45° con respecto al eje de la barra redonda original como se muestra en la Figura 4. Por lo tanto, la parte R/3 tomada como muestra de la barra redonda se inclinó por 45° con respecto al eje central de la barra redonda para medir exactamente la característica de la barra redonda con respecto a la dirección a 45° con respecto al eje central de la barra redonda.

Resistencia a la fatiga

Se cortaron dos ejemplares de ensayo para la resistencia a la fatiga, de forma similar a los dos ejemplares de ensayo para la resistencia a la tracción, de una parte OR (parte central) y una parte R/3, respectivamente. Los ejemplares de ensayo para la resistencia a la fatiga se sometieron a un ensayo de fatiga giratoria de flexión en las siguientes condiciones de ensayo.

Ejemplar de ensayo: ejemplar liso de 10 mm de diámetro.

Método de ensayo: ensayo de fatiga giratoria de flexión (radio de tensión: 1, velocidad de giro: 3600 rpm).

Método de evaluación de la resistencia a la fatiga: método por etapas.

Etapas de tensión: 20 MPa.

Número de ejemplares: 5.

Resistencia a la fatiga: (tensión de ruptura) - (tensión de diferencia)

Relación del límite de resistencia

**Relación del límite de resistencia = (resistencia a la fatiga) / (resistencia a la tracción)**

Se calculó usando los datos obtenidos del ensayo de resistencia a la tracción y el ensayo de resistencia a la fatiga.

Las Muestras 1 a 9 cumplieron con la composición química y la densidad numérica de partículas de inclusión de una longitud superior a 5 µm requeridas por la presente invención. Las partes OR de las Muestras 1 a 9 presentaron altas relaciones del límite de resistencia superiores a 0,45.

Las partes R/3 de las Muestras 1 a 9 presentaron altas relaciones del límite de resistencia no inferiores a 0,46. La relación del límite de resistencia de la parte R/3 de cada muestra fue mayor que la de la parte OR de la misma muestra por las siguientes razones.

La parte R/3 como ejemplar de ensayo de fatiga está inclinada 45° con respecto al eje central de la barra redonda forjada (forjado). Las inclusiones contenidas en el forjado están inclinadas 45° con respecto al ejemplar de ensayo para la resistencia a la fatiga como se muestra en la Figura 2. La resistencia a la fatiga depende del área de proyección con respecto a la dirección de acción de la fuerza principal. Las inclusiones inclinadas con una inclinación de 45° tienen un área de proyección pequeña. En consecuencia, la resistencia a la fatiga es relativamente alta, y por lo tanto la relación del límite de resistencia de la parte R/3 es mayor que la de la parte OR.

En la Muestra 10, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti superiores a 5 µm de longitud es mayor que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado, y las respectivas relaciones del límite de resistencia de la parte OR y la parte R/3 son inferiores a 0,45 e inferiores a 0,46, respectivamente.

En la Muestra 11, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S superiores a 5 µm de longitud es mayor que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado, y las respectivas relaciones del límite de resistencia de la parte OR y la parte R/3 son inferiores a 0,45 e inferiores a 0,46, respectivamente.

En cada una de las Muestras 12 y 13, el contenido de Ti es mayor que el especificado por la presente invención, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti superiores a 5 µm de longitud es mayor que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado, y las respectivas relaciones del límite de resistencia de la parte OR y la parte R/3 son inferiores a 0,45 e inferiores a 0,46, respectivamente.

En cada una de las Muestras 14 y 15, el contenido de S es mayor que el especificado por la presente invención, la densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen S superiores a 5 µm de longitud es mayor que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado, y las respectivas relaciones del límite de resistencia de la parte OR y la parte R/3 son inferiores a 0,45 e inferiores a 0,46, respectivamente.

En cada una de las Muestras 16 y 17, el contenido de S y el contenido de Ti son mayores que los especificados por la presente invención, las respectivas densidades de inclusiones que contienen S superiores a 5 µm de longitud y las inclusiones que contienen Ti superiores a 5 µm de longitud son mayores que los límites superiores de los intervalos de densidad numérica deseado los, respectivamente, y las respectivas relaciones del límite de resistencia de la parte OR y la parte R/3 son inferiores a 0,45 e inferiores a 0,46, respectivamente.

#### Ejemplo 2

Se prepararon lingotes de ensayo de 20 kg que tenían un contenido de S no superior a un 0,0003 % en masa o un contenido de Ti no superior a un 0,0004 % en masa, y que tenían, respectivamente, las composiciones químicas que se muestran en la Tabla 2, usando un horno de fusión al vacío. Tales contenidos muy bajos de Ti y S se midieron por análisis usando un espectrómetro de masas de descarga luminosa (GD-MS). Los datos medios se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Muestra N°	Composición (porcentaje en masa)											Densidad numérica de las partículas de inclusión (superior a 5 µm) (partículas/cm²)	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ca	S	Ti	que contienen S	que contienen Ti
18	0,35	0,22	0,75	0,35	1,88	0,32	0,08	0,035	-	0,0003	0,0004	14	0
19	0,65	0,24	0,63	0,22	1,62	0,32	0,07	0,018	-	0,0003	0,0002	18	0
20	0,58	0,22	0,61	0,34	1,83	0,31	0,07	0,035	-	0,0002	0,0003	6	0
21 *	0,45	0,36	1,01	0,48	1,79	0,32	0,11	0,021	0,0006	0,0016	0,0001	114	0
22 *	0,61	0,32	0,75	0,31	2,03	0,35	0,18	0,016	0,0005	0,0003	0,0001	22	0
23 *	0,58	0,27	0,86	0,44	1,76	0,26	0,09	0,016	-	0,0001	0,0007	2	12
24 *	0,38	0,31	0,99	0,41	1,92	0,25	0,09	0,037	-	0,0001	0,0001	4	0
25 *	0,65	0,25	1,02	0,22	2,01	0,25	0,10	0,034	0,0005	0,0023	0,0001	125	0
26 *	0,57	0,31	1,03	0,44	2,19	0,35	0,10	0,024	-	0,0001	0,0035	6	33

\* no de acuerdo con la invención

5 La basicidad de la escoria (C/S) y C/A no se muestra en la Tabla 2 debido a que los lingotes eran lingotes de laboratorio y no se usó ningún refinado de escoria para preparar los lingotes. Dado que la cantidad de los lingotes de laboratorio fue insuficiente para el ensayo de fatiga, no se pudo llevar a cabo el ensayo de fatiga y por lo tanto no se pudo calcular la relación del límite de resistencia. Como se ha mencionado anteriormente en relación con el Ejemplo 1, la resistencia a la fatiga depende de la densidad numérica de inclusiones específicas. Por lo tanto, se puede inferir que las Muestras 18 a 20 que tienen densidades de inclusiones que contienen S superiores a 5 µm de longitud e inclusiones que contienen Ti superiores a 5 µm de longitud casi iguales o inferiores a las del Ejemplo 1, tienen relaciones del límite de resistencia elevadas iguales o mayores que las del Ejemplo 1, respectivamente.

10 Las densidades de las inclusiones que contienen S superiores a 5 µm de longitud de las Muestras 21 y 25 son mayores que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado. Por lo tanto, se infiere que las Muestras 21 y 25 son insatisfactorias en la relación del límite de resistencia. La densidad numérica de las partículas de inclusión que contienen Ti superiores a 5 µm de longitud de la Muestra 26 es mayor que el límite superior del intervalo de densidad numérica deseado. Por lo tanto, se infiere que la Muestra 26 es insatisfactoria en la relación del límite de resistencia.

Ejemplo 3

20 Resistencia al agrietamiento por hidrógeno

Las susceptibilidades al agrietamiento por hidrógeno de los ejemplares de los forjados de acero de los Ejemplos 1 y 2 se evaluaron empíricamente mediante ensayos comparativos de susceptibilidad al hidrógeno.

25 Una muestra que tenía forma de barra redonda se procesó para formar un ejemplar que tenía forma de mancuerna de 150 mm de longitud y 10 mm de longitud libre. El ejemplar tenía una parte intermedia de 4 mm de diámetro, y partes extremas, en concreto, partes de agarre, de 8 mm de diámetro. Se formó una rosca de 15 mm de longitud en el ejemplar. Como se muestra en la Figura 3, se ensayó el ejemplar 1 sumergido en una solución acuosa 2 de 0,5 mol/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,01 mol/l de KSCN.

30 Cada ejemplar se sumergió en una solución acuosa, y se suministró una corriente al ejemplar con una densidad de corriente de 0,5 A/dm<sup>2</sup> para electrólisis catódica. De ese modo, el ejemplar se montó en el aparato que se muestra en la Figura 3 mientras se añadía hidrógeno al ejemplar. Se aplicó una carga de tracción al ejemplar en una dirección axial para un SSRT (ensayo de velocidad de tensión lenta) y se midió la tensión S<sub>1</sub> (elongación) inducida en el ejemplar. Se tiró el ejemplar con una velocidad de tracción de 2 x 10<sup>-3</sup> mm/min.

35 Se ensayó un ejemplar mediante SSRT en las mismas condiciones de tracción en la atmósfera sin sumergir el ejemplar en la solución acuosa. Se midió la tensión de ruptura inducida de ese modo en cada uno de los ejemplares.

40 El valor S de susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno se calculó usando los datos medidos y la Expresión (3).

$$S = \{1 - (S_1/S_0)\} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

Los datos calculados se muestran en la Tabla 3.

45 La susceptibilidad al agrietamiento por hidrógeno de cada uno de los forjados de acero se clasificó de acuerdo con los estándares representados por las marcas que se muestran a continuación.

- Círculo doble: S < 30, resistencia al agrietamiento por hidrógeno muy alta.
- Círculo: S = 30 a 40, resistencia al agrietamiento por hidrógeno alta.
- Triángulo: S = 40 a 50, resistencia al agrietamiento por hidrógeno media.
- Cruz: S > 50, resistencia al agrietamiento por hidrógeno mala.

Tabla 3

Muestra N°	Composición (porcentaje en masa)											Densidad numérica de las partículas de inclusión (entre 1 y 5 µm) (partículas/cm²)		Resistencia al agrietamiento por hidrógeno (% en masa)	Clasificación f de resistencia al agrietamiento por hidrógeno		
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ca	S	Ti	que contienen S	que contienen Ti				
1 *	0,60	0,22	1,00	0,42	2,05	0,35	0,08	0,035	-	0,0010	0,0011	40	6	72	27	27	⊙
2 *	0,70	0,19	0,80	0,75	1,15	0,28	0,12	0,025	-	0,0010	0,0016	24	1	41	19	28	⊙
3	0,43	0,17	0,77	0,74	1,12	0,26	0,10	0,026	-	0,0010	0,0009	20	0	35	12	31	○
4 *	0,30	0,22	0,91	0,40	2,04	0,30	0,05	0,039	-	0,0009	0,0005	16	0	25	9	34	○
5 *	0,45	0,36	0,69	1,70	1,75	0,32	0,19	0,026	-	0,0006	0,0012	31	2	55	25	29	⊙
6 *	0,25	0,29	0,55	1,62	1,55	0,21	0,15	0,026	-	0,0008	0,0009	58	0	91	13	32	○
7 *	0,31	0,23	1,05	0,25	1,65	0,29	0,06	0,025	0,0005	0,0012	0,0008	55	5	88	14	31	○
8 *	0,40	0,26	0,85	0,31	2,05	0,28	0,10	0,022	-	0,0018	0,0016	32	20	47	35	28	⊙
9 *	0,45	0,20	0,82	0,36	1,75	0,26	0,09	0,022	-	0,0004	0,0025	21	27	40	45	27	⊙
10	0,66	0,29	0,91	0,21	1,99	0,33	0,09	0,018	-	0,0008	0,0022	28	33	35	50	26	⊙
11	0,65	0,21	0,60	0,28	1,85	0,35	0,07	0,021	-	0,0018	0,0014	105	8	155	27	48	Δ
12	0,32	0,30	1,00	0,21	1,96	0,25	0,05	0,017	-	0,0020	0,0031	89	35	139	68	27	⊙
13	0,32	0,25	1,10	0,22	2,01	0,25	0,10	0,033	-	0,0003	0,0051	30	41	51	91	25	⊙
14	0,61	0,30	0,73	1,72	1,83	0,35	0,20	0,020	-	0,0050	0,0009	273	12	393	33	75	X
15	0,30	0,25	0,56	1,58	1,56	0,26	0,15	0,018	-	0,0023	0,0005	113	0	161	11	53	X
16	0,58	0,37	1,08	0,23	2,23	0,32	0,06	0,021	-	0,0050	0,0058	208	44	312	132	53	X
17	0,60	0,36	1,12	0,22	2,15	0,32	0,07	0,020	-	0,0030	0,0054	240	40	388	98	54	X
18 *	0,35	0,22	0,75	0,35	1,88	0,32	0,08	0,035	-	0,0003	0,0004	14	0	30	17	29	⊙
19	0,65	0,24	0,63	0,22	1,62	0,32	0,07	0,018	-	0,0003	0,0002	18	0	27	4	41	Δ
20	0,58	0,22	0,61	0,34	1,83	0,31	0,07	0,035	-	0,0002	0,0003	6	0	9	5	44	Δ
21	0,45	0,36	1,01	0,48	1,79	0,32	0,11	0,021	0,0006	0,0016	0,0001	114	0	162	2	81	X

Muestra Nº	Composición (porcentaje en masa)											Densidad numérica de las partículas de inclusión (superior a 5 µm) (partículas/cm <sup>2</sup> )	Densidad numérica de las partículas de inclusión (entre 1 y 5 µm) (partículas/cm <sup>2</sup> )		Resistencia al agrietamiento por hidrógeno (% en masa)	Clasificación f de resistencia al agrietamiento por hidrógeno	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ca	S	Ti		que contienen S	que contienen Ti			
22	0,61	0,32	0,75	0,31	2,03	0,35	0,18	0,016	0,0005	0,0003	0,0001	22	0	44	3	58	X
23	0,58	0,27	0,86	0,44	1,76	0,26	0,09	0,016	-	0,0001	0,0007	2	12	4	16	50	X
24	0,38	0,31	0,99	0,41	1,92	0,25	0,09	0,037	-	0,0001	0,0001	4	0	8	0	55	X
25	0,65	0,25	1,02	0,22	2,01	0,25	0,10	0,034	0,0005	0,0023	0,0001	125	0	181	1	82	X
26	0,57	0,31	1,03	0,44	2,19	0,35	0,10	0,024	-	0,0001	0,0035	6	33	5	71	51	X

\* De acuerdo con la invención



Las características de inclusión de cada ejemplar y la resistencia al agrietamiento por hidrógeno de cada acero forjado se muestran en la Tabla 3. Las Muestras 1 a 9 y 18 cumplen con la composición química y las condiciones de densidad numérica de partículas de inclusión de 1 a 5  $\mu\text{m}$  de longitud especificadas por la presente invención, y fueron excelentes en resistencia al agrietamiento por hidrógeno. También fueron excelentes en relación del límite de resistencia y se probó que eran aceros forjados óptimos.

Las Muestras 19 a 26 tuvieron una densidad numérica de partículas de inclusión que contienen S o que contienen Ti entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  de longitud inferior al límite inferior de la densidad numérica especificada por la presente invención. Por lo tanto, las muestras fueron satisfactorias en relación del límite de resistencia, pero insatisfactorias en resistencia al agrietamiento por hidrógeno. Por lo tanto, estas muestras necesitan procesarse mediante un proceso de deshidrogenación para controlar estrictamente el contenido de hidrógeno de las mismas.

Las Muestras 11, y 14 a 17 tuvieron una densidad numérica de partículas de inclusión que contienen S superiores a 5  $\mu\text{m}$  de longitud superior al límite superior de la densidad numérica deseada especificada por la presente invención, y fueron insatisfactorias tanto en relación del límite de resistencia como en resistencia al agrietamiento por hidrógeno.

**REIVINDICACIONES**

1. Un acero forjado que consiste en:

- 5 de un 0,15 a un 0,75 % en masa de C,  
 de un 0,1 a un 0,6 % en masa de Si,  
 de un 0,3 a un 1,4 % en masa de Mn,  
 de un 0,1 a un 2 % en masa de Ni,  
 de un 0,5 a un 2,5 % en masa de Cr,  
 10 de un 0,1 a un 0,5 % en masa de Mo,  
 de un 0,01 a un 0,2 % en masa de V,  
 de un 0,015 a un 0,04 % en masa de Al,  
 de un 0,0002 a un 0,002 % en masa de S,  
 15 de un 0,0002 a un 0,003 % en masa de Ti, y opcionalmente uno o más de Ca, B, W, Nb, Ta, Cu, Ce, Zr, y Te, en  
 una cantidad total de un 0,1 % en masa o inferior, y  
 el resto Fe e impurezas inevitables;  
 donde las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que contienen S que tienen un  
 contenido de S de un 20 % en masa o superior, y de las partículas de inclusión que contienen Ti que tienen un  
 contenido de Ti de un 50 % en masa o superior entre las partículas de inclusión superiores a 5 µm de longitud  
 20 presentes en un área de observación de una sección transversal del acero forjado son 100 partículas/cm<sup>2</sup> o  
 inferior, y 30 partículas/cm<sup>2</sup> o inferior, respectivamente, y donde

las respectivas densidades numéricas de las partículas de inclusión que tienen un contenido de S de un 20 % en  
 masa o superior, y de las partículas de inclusión que tienen un contenido de Ti de un 50 % en masa entre las  
 25 partículas de inclusión entre 1 y 5 µm de longitud presentes en la sección transversal del acero forjado son 10  
 partículas/cm<sup>2</sup> o superior y 5 partículas/cm<sup>2</sup> o superior, respectivamente.

2. Un cigüeñal fabricado con el acero forjado de acuerdo con la reivindicación 1.

30 3. El cigüeñal de acuerdo con la reivindicación 2, donde el cigüeñal tiene apoyos de bancada de 200 mm o superior  
 de diámetro.

4. Uso del cigüeñal de acuerdo con la reivindicación 2 o 3 como componente de un motor diesel para generación de  
 35 energía o para un navío.

FIG. 1B

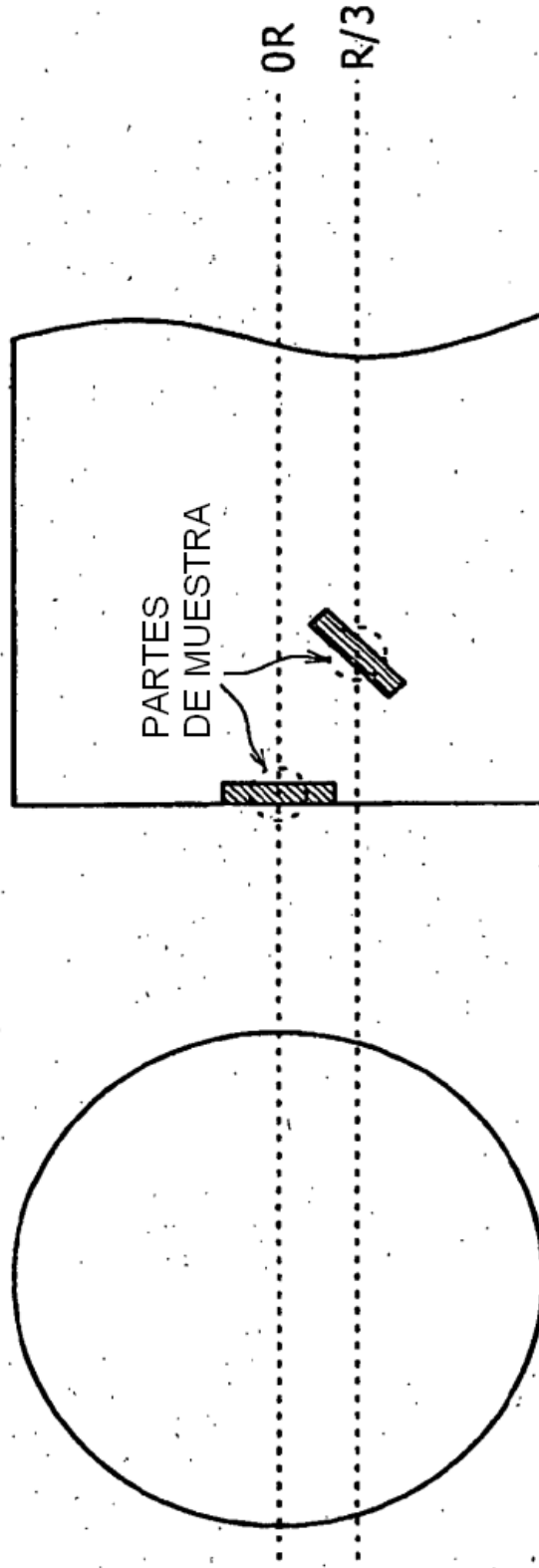


FIG. 1A

FIG. 2B

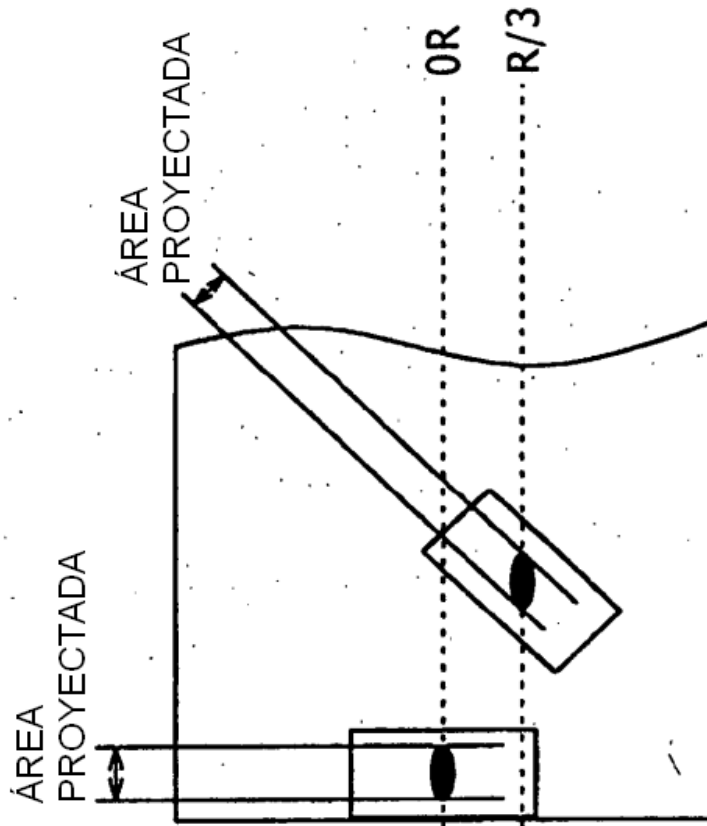


FIG. 2A

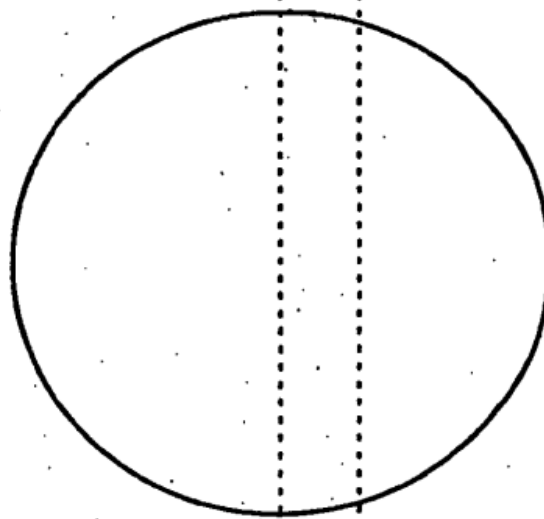


FIG. 3

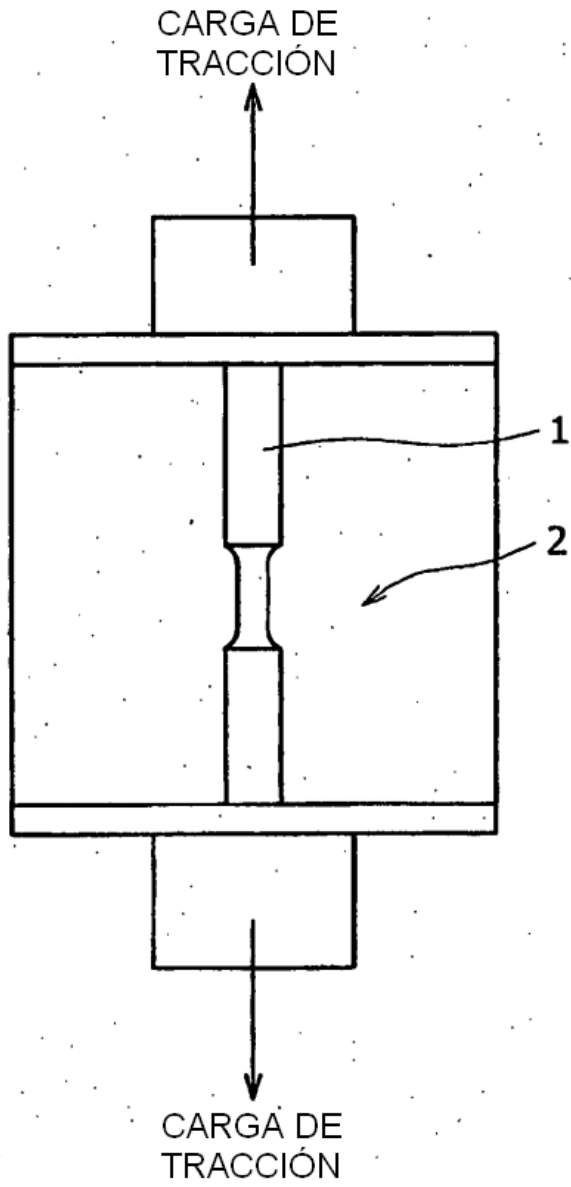


FIG. 4B

FIG. 4A

