

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 807 000**

51 Int. Cl.:

C22C 38/00	(2006.01)	C22C 38/26	(2006.01)
C22C 38/54	(2006.01)	C22C 38/28	(2006.01)
C21D 8/10	(2006.01)	C22C 38/30	(2006.01)
B32B 1/08	(2006.01)	C22C 38/32	(2006.01)
C22C 38/02	(2006.01)	C22C 38/42	(2006.01)
C22C 38/04	(2006.01)	C22C 38/44	(2006.01)
C21D 9/08	(2006.01)	C22C 38/46	(2006.01)
C22C 38/20	(2006.01)	C22C 38/52	(2006.01)
C22C 38/22	(2006.01)	C22C 38/48	(2006.01)
C22C 38/24	(2006.01)	F16L 9/02	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.02.2017 PCT/JP2017/006154**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **08.09.2017 WO17150252**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.02.2017 E 17759718 (4)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.05.2020 EP 3425079**

54 Título: **Material de acero y tubo de acero para pozos de petróleo**

30 Prioridad:

04.03.2016 JP 2016041774

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

19.02.2021

73 Titular/es:

**NIPPON STEEL CORPORATION (100.0%)
6-1, Marunouchi 2-chome, Chiyoda-ku
Tokyo 100-8071, JP**

72 Inventor/es:

ARAI, YUJI

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 807 000 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

Material de acero y tubo de acero para pozos de petróleo

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un material de acero y un tubo de acero para pozos de petróleo, y más particularmente se refiere a un material de acero y un tubo de acero para pozos de petróleo que son adecuados para uso en un entorno ácido.

10

Antecedentes de la técnica

Debido a la profundización de los pozos de petróleo y gas (en lo sucesivo, los pozos de petróleo y gas se denominan colectivamente "pozos de petróleo"), existe demanda para mejorar la resistencia de los tubos de acero para pozos de petróleo. Específicamente, se están utilizando ampliamente tubos de acero de calidad de 80 ksi (el límite elástico es 80 a 95 ksi, es decir, 551 a 654 MPa) y calidad de 95 ksi (el límite elástico es 95 a 110 ksi, es decir, 654 a 758 MPa) para pozos de petróleo, y recientemente se están comenzando a hacer solicitudes para la calidad de 110 ksi (el límite elástico es de 110 a 125 ksi, es decir, 758 a 862 MPa) y la calidad de 125 ksi (límite de elasticidad es 862 MPa o más) de tubo de acero para pozos de petróleo.

15

20

Muchos pozos profundos se encuentran en un ambiente ácido que contiene sulfuro de hidrógeno que es corrosivo. Se requiere que los tubos de acero para pozos de petróleo que se usan en tales entornos ácidos no solo tengan una alta resistencia, sino que también tengan resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro (en lo sucesivo, "resistencia a SSC").

25

Los aceros con características mejoradas de resistencia a fragilidad por hidrógeno (resistencia a SSC y resistencia a fractura retardada) se proponen en la Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 56-5949 (Bibliografía de Patente 1) y en la Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 57-35622 (Bibliografía de Patente 2). Los aceros desvelados en las publicaciones de patentes mencionadas anteriormente contienen Co, y por tanto mejoran las características de resistencia a fragilidad por hidrógeno (resistencia a SSC y resistencia a fractura retardada).

30

Específicamente, se obtiene un acero de alta resistencia a la tracción descrito en la Bibliografía de Patente 1 por templado y revenido acero que tiene una composición química que contiene C: 0,05 a 0,50 %, Si: 0,10 a 0,28 %, Mn: 0,10 a 2,0 %, Co: 0,05 a 1,50 % y Al: 0,01 a 0,10 %, siendo el resto Fe e impurezas inevitables, y tiene un límite elástico de 60 kg/mm² o más.

35

Un acero de pozo de petróleo de alta resistencia desvelado en la Bibliografía de Patente 2 se obtiene sometiendo un acero que tiene una composición química que contiene C: 0,27 a 0,50 %, Si: 0,08 a 0,30 %, Mn: 0,90 a 1,30 %, Cr: 0,5 a 0,9 %, Ni: 0,03 % o menos, V: 0,04 a 0,11 %, Nb: 0,01 a 0,10 %, Mo: 0,60 a 0,80 %, Al: 0,1 % o menos y Co: 3 % o menos, siendo el resto Fe e impurezas inevitables, en el que las impurezas contienen P: 0,005 % o menos y S: 0,003 % o menos, para templar de 880 a 980 °C, y luego revenir de 650 a 700 °C.

40

Sin embargo, en un caso donde está contenido Co en acero con un bajo contenido de C, tal como los aceros desvelados en la Bibliografía de Patentes 1 y la Bibliografía de Patente 2, la fuerza puede ser insuficiente en algunos casos. Por tanto, con respecto a tubos de acero para pozos de petróleo para uso práctico, la producción estable de productos tubulares para campos petrolíferos de calidad 125 ksi (el límite elástico es de 860 MPa o más) con resistencia a SSC que puedan soportar las condiciones estándar (H₂S ambiente a una presión de 1 atm) de una prueba de carga constante como se define en el método NACE TM0177 A, todavía no se ha logrado.

45

En el contexto descrito anteriormente, para obtener una alta resistencia, se está intentando utilizar un acero de alto contenido de carbono, baja aleación que contiene una cantidad de C que es más de 0,45 % que hasta ahora no se ha adoptado para uso práctico, para productos tubulares de campo petrolífero.

50

Un tubo de acero para pozos de petróleo descrito en la Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 2006-265657 (Bibliografía de Patente 3) tiene una composición química que contiene, en % en masa, C: 0,30 a 0,60 %, Si: 0,05 a 0,5 %, Mn: 0,05 a 1,0 %, Al: 0,005 a 0,10 %, Cr + Mo: 1,5 a 3,0 % de los cuales Mo es 0,5 % o más, V: 0,05 a 0,3 %, siendo el resto Fe e impurezas, conteniendo las impurezas 0,025 % o menos de P, 0,01 % o menos de S, 0,0010 % o menos de B y 0,01 % o menos de O (oxígeno), esto se produce sometiendo un acero de baja aleación que tiene una microestructura de metal monofásica de bainita a templado o templado bainítico enfriado con aceite y posteriormente revenido. En la Bibliografía de Patente 3, se describe que, empleando el método de producción descrito anteriormente, el agrietamiento por templado que puede ocurrir durante el templado de una aleación de alto contenido de carbono, baja aleación se puede suprimir, y se obtiene acero para pozos de petróleo o un tubo de acero para pozos de petróleo con excelente resistencia a SSC.

60

Un acero para productos tubulares para campos petrolíferos desvelado en la Publicación de Solicitud Internacional n.º WO 2013/191131 (Bibliografía de Patente 4) tiene una composición química que contiene, en % en masa, C: más de

65

0,35 % a 1,00 %, Si: 0,05 % a 0,5 %, Mn: 0,05 % a 1,0 %, Al: 0,005 % a 0,10 %, Mo: más de 1,0 % a 10 %, P: 0,025 % o menos, S: 0,010 % o menos, O: 0,01 % o menos, N: 0,03 % o menos, Cr: 0 % a 2,0 %, V: 0 % a 0,30 %, Nb: 0 % a 0,1 %, Ti: 0 % a 0,1 %, Zr: 0 % a 0,1 %, Ca: 0 % a 0,01 %, y B: 0 % a 0,003 %, siendo el resto Fe e impurezas, en el que el producto del contenido de C y el contenido de Mo es 0,6 o más. En el acero mencionado anteriormente para productos tubulares de campos petrolíferos, el número de carburos M_2C con un diámetro equivalente circular de 1 nm o más y que tienen una estructura hexagonal es cinco o más por $1 \mu m^2$, y una anchura valor medio de un plano cristalino (211) y una concentración de C satisfacen una relación específica. El acero mencionado anteriormente para productos tubulares para campos petrolíferos también tiene un límite elástico de 758 MPa o más.

10 Sin embargo, existe una demanda de mayor resistencia y una resistencia a SSC más excelente que en los tubos de acero descritos en las Bibliografías de Patente 3 y 4.

15 Además, la evaluación convencional de la resistencia a SSC de un material de acero se ha basado en, por ejemplo, una prueba de tracción o una prueba de flexión tal como la prueba del Método A o la Prueba del Método B definidas en TM0177 NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión). Dado que estas pruebas usan una muestra de prueba sin muesca, no se tienen en cuenta las características de detención de propagación de SSC. Por tanto, incluso en el caso de un material de acero que se evalúa que tiene una excelente resistencia a SSC en las pruebas mencionadas anteriormente, en algunos casos, surge SSC debido a la propagación de grietas latentes en el acero.

20 Acompañando la profundización de pozos petroleros y similares en los últimos años, se requiere que el material de acero para productos tubulares para campos petrolíferos tenga una resistencia a SSC más excelente en comparación con el material de acero utilizado en el pasado. Por tanto, para mejorar aún más la resistencia a SSC, es preferible no solo evitar la aparición de SSC, sino también suprimir la propagación de SSC. Es necesario mejorar la dureza del acero para suprimir la propagación de SSC en el acero. Desde este punto de vista, se realiza una prueba de DCB (doble viga en voladizo) según el método D definido en TM0177 NACE en acero. En la prueba de DCB, se requiere que el material de acero para productos tubulares de campos petrolíferos que se utilizará en un entorno altamente corrosivo tenga una alta tenacidad a la fractura (en lo sucesivo, denominada " $K_{I\text{SSC}}$ ").

30 El documento EP 2 915 896 A1 describe un acero de baja aleación para productos tubulares para campos petrolíferos con una composición química que contiene, en porcentaje en masa, C: 0,56 a 1,00 %, Si: 0,05 a 0,50 %, Mn: 0,05 a 1,00 %, P: como máximo 0,025 %, S: como máximo 0,010 %, Al: 0,005 a 0,100 %, Mo: 0,40 a 1,00 %, V: 0,05 a 0,30 %, y O: como máximo 0,010 %, siendo el resto Fe e impurezas, en donde el límite elástico del mismo es de al menos 862 MPa, y la anchura del valor medio de una superficie cristalina [211] obtenida por difracción de rayos X es como máximo $0,50^\circ$.

35 El documento WO 2016/013205 describe un tubo de acero para pozos de petróleo de baja aleación que tiene un límite elástico de 827 MPa o más, y una excelente resistencia a SSC. El tubo de acero para pozos de petróleo de baja aleación según la presente invención que consiste en: en % en masa, C: más de 0,35 a 0,65 %; Si: 0,05 a 0,50 %; Mn: 0,10 a 1,00 %; Cr: 0,40 a 1,50 %; Mo: 0,50 a 2,00 %; V: 0,05 a 0,25 %; Nb: 0,01 a 0,040 %; Al sol.: 0,005 a 0,10 %; N: 0,007 % o menos; Ti: 0 a 0,012 %; Ca: 0 a 0,005 %; y siendo el resto Fe e impurezas, incluyendo las impurezas: P: 0,020 % o menos; S: 0,002 % o menos; O: 0,006 % o menos; Ni: 0,10 % o menos; Cu: 0,03 % o menos; y B: 0,0005 % o menos, en donde en una microestructura, un número de partículas de cementita cada una de las cuales tiene un diámetro circular equivalente de 200 nm o más es 200 partículas/100 μm^2 o más, y un límite elástico es de 827 MPa o más.

45

Listado de citas bibliográficas

Bibliografía de patente

- 50 Bibliografía de patente 1: Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 56-5949
 Bibliografía de patente 2: Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 57-35622
 Bibliografía de patente 3: Publicación de Solicitud de Patente Japonesa n.º 2006-265657
 Bibliografía de patente 4: Publicación de solicitud internacional n.º WO 2013/191131

55 Sumario de la invención

Problema técnico

60 Un objeto de la presente invención es proporcionar un material de acero para productos tubulares de campos petrolíferos que tenga una alta resistencia de 860 MPa o más y una excelente resistencia a SSC.

Solución al problema

65 Un material de acero según la presente invención tiene una composición química que consiste en, en % en masa, C: más de 0,45 a 0,65 %, Si: 0,10 a 1,0 %, Mn: 0,1 a 1,0 %, P: 0,050 % o menos, S: 0,010 % o menos, Al: 0,01 a 0,1 %, N: 0,01 % o menos, Cr: 0,1 a 2,5 %, Mo: 0,25 a 5,0 %, Co: 0,05 a 5,0 %, Cu: 0 a 0,50 %, Ni: 0 a 0,50 %, Ti: 0 a

0,030 %, Nb: 0 a 0,15 %, V: 0 a 0,5 %, B: 0 a 0,003 %, Ca: 0 a 0,004 %, Mg: 0 a 0,004 %, Zr: 0 a 0,004 %, y metal de tierra rara: 0 a 0,004 %, siendo el resto Fe e impurezas, y que satisface las expresiones (1) y (2), en donde la microestructura contiene, en relación en volumen, 90 % o más de martensita revenida:

$$5 \quad C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + \alpha \geq 0,70 \quad (1)$$

$$(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr) \geq 1,0 \quad (2)$$

$$10 \quad B \text{ eficaz} = B - 11(N - Ti/3,4)^{14} \quad (3)$$

donde, α en la expresión (1) es 0,250 cuando B eficaz (% en masa) definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %. Un contenido (% en masa) de un elemento correspondiente se sustituye por cada símbolo de un elemento en la expresión (1) a la expresión (3).

15 Efectos ventajosos de la invención

El material de acero según la presente invención tiene una alta resistencia y una excelente resistencia a SSC.

Breve descripción de los dibujos

20 [FIG. 1] FIG. 1 es una vista que ilustra una relación entre $F2 = (3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr)$ y un valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ (unidades $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

25 [FIG. 2A] FIG. 2A ilustra una vista lateral y una vista en sección de una muestra de prueba de DCB que se usa en una prueba de DCB en los ejemplos. Los números en la FIG. 2A indican longitud (unidades en "mm") de cada parte correspondiente.

[FIG. 2B] FIG. 2B es una vista en perspectiva de una cuña que se utiliza en la prueba de DCB en los ejemplos. Los números en la FIG. 2B indican longitud (unidades en "mm") de cada parte correspondiente.

Descripción de realizaciones

30 Los presentes inventores realizaron investigaciones y estudios respecto a la resistencia a SSC de un material de acero que tenía una alta resistencia de 860 MPa o más, y obtuvieron los siguientes hallazgos.

35 (1) Co mejora la resistencia a SSC. En particular, en un material de acero que tiene una composición química que contiene, en % en masa, C: más de 0,45 a 0,65 %, Si: 0,10 a 1,0 %, Mn: 0,1 a 1,0 %, P: 0,050 % o menos, S: 0,010 % o menos, Al: 0,01 a 0,1 %, N: 0,01 % o menos, Cr: 0,1 a 2,5 %, Mo: 0,25 a 5,0 %, Co: 0,05 a 5,0 %, Cu: 0 a 0,50 %, Ni: 0 a 0,50 %, Ti: 0 a 0,030 %, Nb: 0 a 0,15 %, V: 0 a 0,5 %, B: 0 a 0,003 %, Ca: 0 a 0,004 %, Mg: 0 a 0,004 %, Zr: 0 a 0,004 %, y metal de tierra rara: 0 a 0,004 %, cuando Co está contenido en una cantidad de 0,50 % a 5,0 %, se obtiene una excelente resistencia a SSC. Aunque la razón de esto es incierta, se considera que la razón es la siguiente. Durante el uso en un ambiente ácido, Co se concentra en una capa externa del material de acero. La penetración de hidrógeno en el acero se suprime por el Co que se concentra en la capa externa. Se considera que, de esta manera, mejora la resistencia a SSC.

40 (2) Como se describió anteriormente, si está contenida una cantidad específica de Co, se obtiene una excelente resistencia a SSC debido a la concentración de Co en una capa externa. Sin embargo, a diferencia de otro elemento de aleación (C, Mn, Cr, V, Cu, Ni y similar), Co disminuye la templabilidad del acero. Por tanto, si el contenido de Co es alto en comparación con el contenido de C, Mn, Cr, V, Cu y Ni, la templabilidad disminuirá. En este caso, la microestructura será una estructura heterogénea que constará no solo de martensita revenida, si no también bainita o austenita retenida. Por tanto, la resistencia a SSC disminuirá debido a la microestructura. A este respecto, como resultado del estudio de la relación entre Co y otros elementos de aleación con respecto a la resistencia a SSC, los presentes inventores obtuvieron los siguientes hallazgos.

Si la composición química también satisface la expresión (1) y la expresión (2), se obtiene una excelente resistencia a SSC mientras se mantiene la templabilidad:

$$55 \quad C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + \alpha \geq 0,70 \quad (1)$$

$$(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr) \geq 1,0 \quad (2)$$

$$60 \quad B \text{ eficaz} = B - 11(N - Ti/3,4)^{14} \quad (3)$$

donde, α en la expresión (1) es 0,250 cuando B eficaz (% en masa) definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %. Un contenido (% en masa) del elemento correspondiente se sustituye por cada símbolo de un elemento en la expresión (1) a la expresión (3).

65 [Respecto a la expresión (1)]

F1 se define como igual a $C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + a$. F1 es un índice de templabilidad. C, Mn, Cr, Mo, V, Cu y una cantidad predeterminada de B eficaz (B disuelto) mejoran la templabilidad del acero. Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, Co reduce la templabilidad del acero. Si F1 es 0,7 o más, incluso si el acero contiene Co, se obtiene una excelente templabilidad y se puede elevar la relación en volumen de martensita revenida en la microestructura.

En un caso donde la microestructura consiste sustancialmente en martensita revenida, se obtiene una excelente resistencia a SSC. Por otro lado, en un caso donde la microestructura es una estructura heterogénea que consiste en martensita revenida y otras fases (bainita, austenita retenida o similar), la resistencia a SSC disminuye. En un caso donde F1 satisface la expresión (1), la relación en volumen de martensita revenida en la microestructura es 90 % o más, y se obtiene una excelente resistencia a SSC.

[Respecto a la expresión (2)]

Cuando F1 satisface la expresión (1), la microestructura será martensita sustancialmente revenida. Sin embargo, si la composición química contiene una cantidad excesiva de elementos de aleación, la resistencia a SSC, por el contrario, disminuirá porque los elementos de aleación atraparán (acumularán) hidrógeno en el material de acero. Entre los elementos que mejoran la templabilidad, en particular, aunque Mn y Cr mejoran la templabilidad, Mn y Cr pueden disminuir la resistencia a SSC. Por otro lado, junto con el Co descrito anteriormente, C y Mo son elementos que mejoran la resistencia a SSC del acero.

Se define que F2 es igual a $(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr)$. F2 es un índice de resistencia a SSC.

FIG. 1 es una vista que ilustra la relación entre F2 y un valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} (unidades de $MPa\sqrt{m}$). FIG. 1 se obtuvo basándose en pruebas de DCB en las placas de acero correspondientes al calidad C110 de los estándares API en los ejemplos que se describirán más adelante. Por referencia a la FIG. 1, se encuentra que el valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} aumenta rápidamente cuando F2 está cerca de 1,0. Cuando F2 excede 1,0, el valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} realiza transiciones casi constantemente a un valor superior a $27,5 MPa\sqrt{m}$. Es decir, existe un punto de inflexión en el que $F2 = 1,0$.

Basándose en lo anterior, cuando F2 es 1,0 o más, es decir, cuando una proporción del contenido de elementos que mejoran la resistencia a SSC (C, Mo y Co) al contenido de Mn y Cr es grande, se obtiene una excelente resistencia a SSC.

El material de acero según la presente invención que se ha completado basado en los hallazgos anteriores tiene una composición química que consiste en, en % en masa, C: más de 0,45 a 0,65 %, Si: 0,10 a 1,0 %, Mn: 0,1 a 1,0 %, P: 0,050 % o menos, S: 0,010 % o menos, Al: 0,01 a 0,1 %, N: 0,01 % o menos, Cr: 0,1 a 2,5 %, Mo: 0,25 a 5,0 %, Co: 0,05 a 5,0 %, Cu: 0 a 0,50 %, Ni: 0 a 0,50 %, Ti: 0 a 0,030 %, Nb: 0 a 0,15 %, V: 0 a 0,5 %, B: 0 a 0,003 %, Ca: 0 a 0,004 %, Mg: 0 a 0,004 %, Zr: 0 a 0,004 %, y metal de tierra rara: 0 a 0,004 %, siendo el resto Fe e impurezas, y que satisface las expresiones (1) y (2), en donde la microestructura contiene, en relación en volumen, 90 % o más de martensita revenida:

$$C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + \alpha \geq 0,70 \quad (1)$$

$$(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr) \geq 1,0 \quad (2)$$

$$B \text{ eficaz} = B - 11(N - Ti/3,4)^{14} \quad (3)$$

donde, α en la expresión (1) es 0,250 cuando B eficaz (% en masa) definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %. Un contenido (% en masa) de un elemento correspondiente se sustituye por cada símbolo de un elemento en la expresión (1) a la expresión (3).

La composición química descrita anteriormente puede contener uno o más tipos de elementos seleccionados de un grupo que consiste en Cu: 0,02 a 0,50 % y Ni: 0,02 a 0,50 %.

La composición química descrita anteriormente puede contener uno o más tipos de elementos seleccionados de un grupo que consiste en Ti: 0,003 a 0,030 %, Nb: 0,003 a 0,15 %, y V: 0,005 a 0,5 %.

La composición química descrita anteriormente puede contener B: 0,0003 a 0,003 %.

La composición química descrita anteriormente puede contener uno o más tipos de elementos seleccionados de un grupo que consiste en Ca: 0,0003 a 0,004 %, Mg: 0,0003 a 0,004 %, Zr: 0,0003 a 0,004 %, y metal de tierra rara: 0,0003 a 0,004 %.

Al tener la composición química descrita anteriormente, un tubo de acero para pozos de petróleo según la presente invención exhibe una excelente resistencia y resistencia a SSC, incluso con un grosor de pared de 15 mm o más.

A continuación, el material de acero de la presente invención se describe en detalle. El símbolo "%" en relación con un elemento significa "% en masa" a menos que se indique específicamente lo contrario.

5 [Composición química]

El material de acero según la presente invención contiene los siguientes elementos.

C: más de 0,45 a 0,65 %.

10 El carbono (C) mejora la templabilidad y aumenta la resistencia del acero. Cuando el contenido de C es mayor de 0,45 %, con la condición de que el contenido de otros elementos esté dentro del alcance de la presente invención, el límite elástico se puede ser 860 MPa o más. Cuando el contenido de C es alto, la esferoidización de carburos durante el revenido se promueve aún más, y la resistencia a SSC mejora. Además, C se une con Mo o V para formar carburos, mejorando así la resistencia al ablandamiento por revenido. Si los carburos están dispersos, la resistencia del acero aumenta aún más. Estos efectos no se obtendrán si el contenido de C es demasiado bajo. Por otro lado, si el contenido de C es demasiado alto, la dureza del acero disminuirá y es probable que se produzcan agrietamiento por templado. Por tanto, el contenido de C es de más de 0,45 a 0,65 %. Un límite inferior preferente del contenido de C es más de 0,50 %. Un límite superior preferente del contenido de C es 0,60 %.

20 Si: 0,10 a 1,0 %

25 El silicio (Si) desoxida el acero. Si el contenido de Si es demasiado bajo, este efecto no se obtiene. Por otro lado, si el contenido de Si es demasiado alto, la austenita retenida se genera en exceso y la resistencia a SSC disminuye. Por tanto, el contenido de Si es de 0,10 a 1,0 %. Un límite inferior preferente del contenido de Si es 0,15 %, y más preferentemente es 0,20 %. Un límite superior preferente del contenido de Si es 0,85 %, y más preferentemente es 0,50 %.

30 Mn: 0,1 a 1,0 %

35 El manganeso (Mn) desoxida el acero. Mn también aumenta la templabilidad del acero. Si el contenido de Mn es demasiado bajo, estos efectos no se obtienen. Por otro lado, si el contenido de Mn es demasiado alto, Mn se segrega en los límites de grano junto con elementos de impureza tales como fósforo (P) y azufre (S). Como resultado, la resistencia a SSC del acero disminuye. Por tanto, el contenido de Mn es de 0,1 a 1,0 %. Un límite inferior preferente del contenido de Mn es 0,25 %, y más preferentemente es 0,30 %. Un límite superior preferente del contenido de Mn es 0,90 %, y más preferentemente es 0,80 %.

P: 0,050 % o menos

40 El fósforo (P) es una impureza. P se segrega en los límites de grano y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de P es 0,050 % o menos. Un contenido de P preferible es 0,020 % o menos, y más preferentemente es 0,015 % o menos. Preferentemente, el contenido de P es lo más bajo posible.

45 S: 0,010 % o menos

El azufre (S) es una impureza. S se segrega en los límites de grano y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de S es 0,010 % o menos. Un contenido de S preferible es 0,005 % o menos, y más preferentemente es 0,003 % o menos. Preferentemente, el contenido de S es lo más bajo posible.

50 Al: 0,01 a 0,1 %

55 El aluminio (Al) desoxida el acero. Si el contenido de Al es demasiado bajo, este efecto no se obtiene y la resistencia a SSC del acero disminuye. Por otro lado, si el contenido de Al es demasiado alto, surgen inclusiones gruesas y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de Al es de 0,01 a 0,1 %. Un límite inferior preferente del contenido de Al es 0,015 %, y más preferentemente es 0,020 %. Un límite superior preferente del contenido de Al es 0,08 %, y más preferentemente es 0,060 %. En la presente descripción, el contenido de "Al" significa "Al soluble en ácido", es decir, el contenido de "Al sol."

60 N: 0,01 % o menos

65 Está contenido nitrógeno (N) inevitablemente. N forma nitruros gruesos y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de N es 0,01 % o menos. Un contenido de N preferible es 0,005 % o menos, y más preferentemente es 0,004 % o menos. Preferentemente, el contenido de N es lo más bajo posible. Sin embargo, en un caso donde se incluye una cierta cantidad de Ti para refinar el grano de cristal por precipitación de nitruros finos, es preferible incluir N en una cantidad de 0,002 % o más.

ES 2 807 000 T3

Cr: 0,1 a 2,5 %

El cromo (Cr) mejora la templabilidad del acero y aumenta la resistencia del acero. Si el contenido de Cr es demasiado bajo, no se obtienen los efectos mencionados. Por otro lado, si el contenido de Cr es demasiado alto, la tenacidad y resistencia a SSC del acero disminuyen. Por tanto, el contenido de Cr es de 0,1 a 2,5 %. Un límite inferior preferente del contenido de Cr es 0,25 %, y más preferentemente es 0,30 %. Un límite superior preferente del contenido de Cr es 1,50 %, y más preferentemente es 1,30 %.

Mo: 0,25 a 5,0 %

El molibdeno (Mo) aumenta la templabilidad. Mo también genera carburos finos y aumenta la resistencia al ablandamiento por revenido del acero. Como resultado, Mo contribuye a aumentar la resistencia a SSC mediante revenido a alta temperatura. Si el contenido de Mo es demasiado bajo, este efecto no se obtiene. Por otro lado, si el contenido de Mo es demasiado alto, el efecto antes mencionado se satura. Por tanto, el contenido de Mo es de 0,25 a 5,0 %. Un límite inferior preferente del contenido de Mo es 0,50 %, más preferentemente es 0,65 %, y aún más preferentemente es más de 0,70 %. Un límite superior preferente del contenido de Mo es 2,5 %, y más preferentemente es 2,0 %.

Co: 0,05 a 5,0 %

El cobalto (Co) mejora la resistencia a SSC del acero en un ambiente ácido. Aunque la razón no es segura, se considera que la razón es la siguiente. En un ambiente ácido, Co se concentra en la superficie del acero y suprime la penetración de hidrógeno en el acero. Como resultado, la resistencia a SSC del acero mejora. Si el contenido de Co es demasiado bajo, este efecto no se obtiene. Por otro lado, si el contenido de Co es demasiado alto, la templabilidad del acero disminuye y la resistencia del acero disminuye. Por tanto, el contenido de Co es de 0,05 a 5,0 %. Un límite inferior preferente del contenido de Co es 0,1 %, y más preferentemente es 0,15 %. Un límite superior preferente del contenido de Co es del 3,0 %, y más preferentemente es del 2,5 %.

El resto de la composición química del material de acero según la presente realización es Fe e impurezas. Aquí, el término "impurezas" se refiere a elementos que, durante la producción industrial del material de acero, se mezclan desde la mena o mineral que se usa como materia prima del material de acero, o del entorno de producción o similar, y se permiten dentro de un intervalo que no afecta negativamente al material de acero de la presente realización.

[Elementos opcionales]

El material de acero descrito anteriormente puede contener además uno o más tipos de elementos seleccionados del grupo que consiste en Cu y Ni como sustituto de una parte de Fe. Cada uno de estos elementos es un elemento opcional, y cada uno de estos elementos aumenta la resistencia del acero.

Cu: 0 a 0,50 %

El cobre (Cu) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Cu, el Cu aumenta la templabilidad del acero. Sin embargo, si el contenido de Cu es superior a 0,50 %, la templabilidad será demasiado alta y la resistencia a SSC disminuirá. Por tanto, el contenido de Cu es de 0 a 0,50 %. Un límite inferior preferente del contenido de Cu es 0,02 %, y más preferentemente es 0,05 %. Un límite superior preferente del contenido de Cu es 0,35 %, y más preferentemente es 0,25 %.

Ni: 0 a 0,50 %

El níquel (Ni) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Ni, el Ni aumenta la templabilidad del acero. Sin embargo, si el contenido de Ni es superior a 0,50 %, se promoverá la corrosión local y la resistencia a SSC disminuirá. Por tanto, el contenido de Ni es de 0 a 0,50 %. Un límite inferior preferente del contenido de Ni es 0,02 %, y más preferentemente es 0,05 %. Un límite superior preferente del contenido de Ni es 0,35 %, y más preferentemente es 0,25 %.

El material de acero descrito anteriormente puede contener además uno o más tipos de elementos seleccionados del grupo que consiste en Ti, Nb y V como sustituto de una parte de Fe. Cada uno de estos elementos es un elemento opcional, y cada elemento aumenta la resistencia del acero generando precipitados.

Ti: 0 a 0,030 %

El titanio (Ti) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Ti, el Ti forma nitruros y refina los granos de cristal por efecto de fijación. Sin embargo, si el contenido de Ti es demasiado alto, los nitruros de Ti se vuelven gruesos y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de Ti es de 0 a 0,030 %. Un límite inferior preferente del contenido de Ti es 0,003 %, y más preferentemente es 0,005 %. Un límite superior preferente del contenido de Ti es 0,015 %, y más preferentemente es 0,01 %.

ES 2 807 000 T3

Nb: 0 a 0,15 %

5 El niobio (Nb) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Nb, el Nb se une con C y/o N para formar carburos, nitruros o carbo-nitruros. Estos precipitados (los carburos, nitruros, y carbo-nitruros) refinan la subestructura del acero por efecto de fijación y mejoran la resistencia a SSC del acero. Sin embargo, si el contenido de Nb es demasiado alto, los nitruros se generan en exceso y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de Nb es de 0 a 0,15 %. Un límite inferior preferente del contenido de Nb es 0,003 %, y más preferentemente es 0,007 %. Un límite superior preferente del contenido de Nb es 0,05 %, y más preferentemente es 0,04 %.

V: 0 a 0,5 %

15 El vanadio es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido V, el V forma carburos y aumenta la resistencia al ablandamiento por revenido del acero. Como resultado, el V aumenta la resistencia del acero. Sin embargo, si el contenido de V es demasiado alto, la tenacidad del acero disminuye. Por tanto, el contenido de V es de 0 a 0,5 %. Un límite inferior preferente del contenido de V es 0,005 %, y más preferentemente es 0,015 %. Un límite superior preferente del contenido de V es 0,15 %, y más preferentemente es 0,1 %.

20 El material de acero descrito anteriormente puede contener además B como sustituto de una parte de Fe.

B: 0 a 0,003 %

25 El boro (B) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido B, el B mejora la templabilidad del acero. Este efecto aparece incluso si está presente una pequeña cantidad de B que no está fijado a N en el acero. Sin embargo, si el contenido de B es demasiado alto, los nitruros se vuelven gruesos y disminuye la resistencia a SSC del acero. Por tanto, el contenido de B es de 0 a 0,003 %. Un límite inferior preferente del contenido de B es 0,0003 %, y más preferentemente es 0,0007 %. Un límite superior preferente del contenido de B es 0,0015 %, y más preferentemente es 0,0013 %.

30 El material de acero descrito anteriormente puede contener además uno o más tipos de elementos seleccionados del grupo que consiste en Ca, Mg, Zr, y metal de tierra rara como sustituto de una parte de Fe. Cada uno de estos elementos es un elemento opcional, y cada uno de estos elementos mejora la forma de sulfuros para aumentar la resistencia a SSC del acero.

Ca: 0 a 0,004 %

40 El calcio (Ca) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Ca, el Ca refina los sulfuros en el acero, y la resistencia a SSC del acero mejora. Sin embargo, si el contenido de Ca es demasiado alto, se engrosan los óxidos. Por tanto, el contenido de Ca es de 0 a 0,004 %. Un límite inferior preferente del contenido de Ca es 0,0003 %, y más preferentemente es 0,0006 %. Un límite superior preferente del contenido de Ca es 0,0025 %, y más preferentemente es 0,0020 %.

45 Mg: 0 a 0,004 %

50 El magnesio (Mg) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Mg, el Mg refina sulfuros en el acero y mejora la resistencia a SSC del acero. Sin embargo, si el contenido de Mg es demasiado alto, se engrosan los óxidos. Por tanto, el contenido de Mg es de 0 a 0,004 %. Un límite inferior preferente del contenido de Mg es 0,0003 %, y más preferentemente es 0,0006 %. Un límite superior preferente del contenido de Mg es 0,0025 % y más preferentemente es 0,0020 %.

Zr: 0 a 0,004 %

55 El circonio (Zr) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido Zr, el Zr refina los sulfuros en el acero y mejora la resistencia a SSC del acero. Sin embargo, si el contenido de Zr es demasiado alto, se engrosan los óxidos. Por tanto, El contenido de Zr es de 0 a 0,0040 %. Un límite inferior preferente del contenido de Zr es 0,0003 %, y más preferentemente es 0,0006 %. Un límite superior preferente del contenido de Zr es 0,0025 % y más preferentemente es 0,0020 %.

60

Metal de tierra rara: 0 a 0,004 %,

65 El metal de tierra rara (REM) es un elemento opcional y no necesita estar contenido en el acero. En un caso donde está contenido REM, el REM se une con S en el acero para formar sulfuros. De esta manera, Los sulfuros se refinan y la resistencia a SSC del acero mejora. REM también se une con P en el acero y suprime la segregación de P en los límites de grano de cristal. Por tanto, se suprime una disminución en la resistencia a SSC del acero que se debe a la

segregación de P. Sin embargo, si el contenido de REM es demasiado alto, se engrosan los óxidos. Por tanto, el contenido de REM es de 0 a 0,004 %. Un límite inferior preferente del contenido de REM es 0,0003 %, y más preferentemente es 0,0006 %. Un límite superior preferente del contenido de REM es 0,0025 % y más preferentemente es 0,0020 %.

5 En la presente descripción, el término "REM" es un término genérico que se refiere a los 15 elementos lantánidos e Y y Sc. El término "está contenido REM" significa que uno o más tipos de los elementos mencionados están contenidos en el material de acero. El término "contenido de REM" se refiere al contenido total de los elementos mencionados anteriormente.

10 [Respecto a la expresión (1) y la expresión (2)]

La composición química descrita anteriormente satisface además la expresión (1) y la expresión (2):

15
$$C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + \alpha \geq 0,70 \quad (1)$$

$$(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr) \geq 1,0 \quad (2)$$

20
$$B \text{ eficaz} = B - 11(N - Ti/3,4)14 \quad (3)$$

donde, α en la expresión (1) es 0,250 cuando B eficaz (% en masa) definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %. Un contenido (% en masa) del elemento correspondiente se sustituye por cada símbolo de un elemento en la expresión (1) a la expresión (3).

25 [Respecto a la expresión (1)]

F1 se define como igual a $C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + a$. F1 es un índice de templabilidad. Si F1 es 0,70 o más, incluso si el acero contiene Co, se obtiene una excelente templabilidad y la relación en volumen de martensita revenida en la microestructura se convierte en 90 % o más. Como resultado, se obtiene una excelente resistencia a SSC. Un límite inferior preferente de F1 es 0,8.

30 El valor de a en F1 se determina según la cantidad de B eficaz (cantidad de B disuelto) que se define por la expresión (3). Específicamente, a es 0,250 cuando B eficaz definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %. Si el valor B eficaz definido por la expresión (3) es mayor que el contenido de B, el valor de B eficaz se considera igual al contenido de B.

[Respecto a la expresión (2)]

40 Se define que F2 es igual a $(3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr)$. F2 es un índice de resistencia a SSC. Cuando F2 es 1,0 o más, la relación entre el contenido de elementos que mejoran la resistencia a SSC (C, Mo y Co) y el contenido de Mn y Cr (elementos que, aunque contribuyen a la templabilidad, pueden disminuir la resistencia a SSC si están contenidos en una cantidad excesiva) es elevada. Como resultado, se obtiene excelente resistencia a SSC en ambiente de H₂S de alta presión. Un límite inferior preferente de F2 es 1,5.

45 [Microestructura]

La microestructura del material de acero de la presente invención consiste principalmente en martensita revenida. Más específicamente, la microestructura contiene, en relación en volumen, 90 % o más de martensita revenida. El resto de la microestructura es, por ejemplo, bainita y austenita retenida o similar. Cuando la microestructura contiene 90 % o más de martensita revenida en relación en volumen, la resistencia a SSC mejora. Preferentemente, la microestructura es una microestructura monofásica de martensita revenida.

50 La relación en volumen de martensita revenida contenida en la microestructura tiene una correlación con una diferencia entre un valor máximo y un valor mínimo de la dureza Rockwell (HRC) en el material de acero después del temple y revenido.

55 El valor máximo de la dureza Rockwell después de temple y revenido se define como "HRCmax". El valor mínimo de la dureza Rockwell después de temple y revenido se define como "HRCmin". La diferencia entre HRCmax y HRCmin se define como "AHRC".

60
$$\Delta HRC = HRCmax - HRCmin$$

Cuando ΔHRC es menos de 2,0, la relación en volumen de martensita revenida en la microestructura del material de acero se considera 90 % o más.

Por ejemplo, la dureza Rockwell en la superficie del material de acero es HRCmax, y la dureza Rockwell en una sección central del grosor del material de acero (en lo sucesivo, "sección central del material de acero") es HRCmin. La razón es la siguiente. La velocidad de enfriamiento durante temple y el enfriamiento es rápida en la superficie del material de acero y lenta en la sección central del material de acero. Por tanto, en el material de acero que está en estado templado, en algunos casos, surge una gran diferencia con respecto a la relación en volumen de martensita entre la superficie del material de acero y la sección central del material de acero. Debido a que la relación en volumen de martensita en la microestructura tiene correlación con la dureza Rockwell, en este caso, la diferencia en la dureza Rockwell entre la superficie del material de acero y la sección central del material de acero en el estado templado es elevada. Cuando el material de acero se somete a revenido, aunque la dureza disminuye tanto en la superficie del material de acero como en la sección central del material de acero, y la diferencia entre la dureza Rockwell en la superficie del material de acero y la sección central del material de acero también se reduce, permanece una diferencia en la dureza Rockwell entre la superficie del material de acero y la sección central del material de acero. Por tanto, la dureza Rockwell en la superficie del material de acero es HRCmax, y la dureza Rockwell en la sección central del material de acero es HRCmin. Si AHRC es 2,0 o más, la dureza en la sección central del material de acero es demasiado baja. Si AHRC es menor que 2,0, también se obtiene una dureza suficiente en la sección central del material de acero, y en este caso la relación en volumen de martensita revenida en la sección central del material de acero se considera 90 % o más.

El siguiente método se utiliza para medir AHRC. La dureza Rockwell (HRC) se determina realizando una prueba de dureza Rockwell (escala C) según JIS Z2245 (2011) en tres lugares arbitrarios en posiciones a una profundidad de 2,0 mm desde la superficie del material de acero (superficie exterior en el caso de un tubo de acero) después de temple y revenido, en posiciones a una profundidad de 2,0 mm desde la superficie posterior del material de acero (superficie interior en el caso de un tubo de acero), y en posiciones intermedias en la dirección del grosor del material de acero, respectivamente. El valor máximo de la dureza obtenida se toma como HRCmax y el valor mínimo se toma como HRCmin, y si AHRC es menor que 2,0, se determina que la relación en volumen de martensita revenida es 90 % o más. Si AHRC es 2,0 o más, se determina que la relación en volumen de martensita revenida en la posición de HRCmin es inferior a 90 %.

[Forma del material de acero]

La forma del material de acero no se limita particularmente. El material de acero es, por ejemplo, un tubo de acero o una placa de acero. En un caso donde el material de acero es un tubo de acero para pozos de petróleo, un grosor de pared preferente es 9 a 60 mm. La presente invención es, en particular, adecuada para su uso como tubo de acero de pozo de petróleo con una pared pesada. Más específicamente, incluso si el material de acero según la presente invención es un tubo de acero para pozo de petróleo con una pared gruesa de 15 mm o más o, además, 20 mm o más, el material de acero exhibe una excelente resistencia y resistencia a SSC.

[Límite elástico y valor de tenacidad a la fractura]

El límite elástico del material de acero de la presente invención es 860 MPa o más. El término "límite elástico", como se usa en el presente documento, se refiere a un punto de límite inferior en una curva de tensión-deformación obtenida mediante un ensayo de tracción. Además, un valor preferente de tenacidad a la fractura del material de acero de la presente invención es mayor de 27,5 MPa√m.

[Método de producción]

Un método para producir un tubo de acero para pozos de petróleo se describirá ahora como un ejemplo de un método para producir el material de acero descrito anteriormente. El método para producir un tubo de acero para pozos de petróleo incluye un proceso de preparación de un material de partida (proceso de preparación), un proceso de someter el material de partida a laminación en caliente para producir una carcasa hueca (proceso de laminación), y un proceso de someter la carcasa hueca a temple y revenido para obtener un tubo de acero de pozo de petróleo (proceso de temple y proceso de revenido). Cada uno de estos procesos se describe en detalle a continuación.

[Proceso de preparación]

Se produce acero fundido que tiene la composición química descrita anteriormente y satisface la expresión (1) y expresión (2). Se produce un material de partida utilizando el acero fundido. Específicamente, una pieza de colada (plancha, desbaste o palanquilla) se produce mediante un proceso de colada continua utilizando el acero fundido. También se puede producir un lingote mediante un proceso de fabricación de lingotes utilizando el acero fundido. Según sea necesario, la plancha, desbaste o lingote pueden someterse a un procedimiento para producir una palanquilla. Los procesos descritos anteriormente producen un material de partida (una plancha, desbaste o palanquilla).

[Proceso de trabajo en caliente]

El material de partida preparado se somete a trabajo en caliente para producir una carcasa hueca. Primero, la

5 palanquilla se calienta en un horno de calentamiento. La palanquilla que se extrae del horno de calentamiento se somete a trabajo en caliente para producir una carcasa hueca (tubo de acero sin costuras). Por ejemplo, el proceso de Mannesmann se realiza como trabajo en caliente para producir la carcasa hueca. En este caso, una palanquilla redonda se lamina mediante perforación con una máquina perforadora. La palanquilla redonda laminada perforada se lamina además en caliente en una carcasa hueca utilizando un molino de mandriles, un reductor, un molino de tamaño o similar.

10 La carcasa hueca también se puede producir a partir de la palanquilla mediante otro método de trabajo en caliente. Por ejemplo, en el caso de un tubo de acero para pozo de petróleo de paredes pesadas de una longitud corta tal como un acoplamiento, se puede producir una cáscara hueca por forja. Mediante los procesos anteriores, se produce una carcasa hueca que tiene un grosor de pared de 9 a 60 mm.

15 La carcasa hueca producida por el trabajo en caliente puede enfriarse por aire (según se lamina). El tubo de acero producido mediante trabajo en caliente puede someterse a templado directo después del laminado en caliente sin enfriarse a temperatura normal, o al calentamiento concurrente (recalentamiento) posterior al laminado en caliente antes de someterse a templado. Sin embargo, en el caso de realizar un templado directo o después de un calentamiento concurrente, es preferente detener el enfriamiento durante el proceso de templado o realizar un enfriamiento lento con el fin de suprimir el agrietamiento por templado.

20 En un caso donde el templado se realiza directamente después del laminado en caliente, o después del calentamiento concurrente posterior al laminado en caliente, para eliminar el estrés residual, es preferente realizar un tratamiento de alivio del estrés (tratamiento SR) en un momento posterior al templado y antes del tratamiento térmico del siguiente proceso. El proceso de templado se describe en detalle a continuación.

25 [Proceso de templado]

30 El templado se realiza en la carcasa hueca después del trabajo en caliente. La temperatura de templado es, por ejemplo, 800 a 1000 °C. Debido a que el contenido de C del material de acero de la presente invención es alto, es preferente realizar un enfriamiento lento durante el templado.

35 Por ejemplo, el material de acero se enfría continuamente desde la temperatura de inicio de templado, y la temperatura de la superficie del material de acero disminuye continuamente. Como tratamiento de enfriamiento continuo, por ejemplo, un método para enfriar el material de acero por inmersión en un baño de aceite, o un método para enfriar lentamente el material de acero mediante enfriamiento con agua de ducha, enfriamiento por neblina o pulverización de aceite, puede aplicarse.

40 Preferentemente, el templado se realiza después de repetir el calentamiento del material de acero en la zona de austenita una pluralidad de veces. En este caso, la resistencia a SSC mejora porque los granos de austenita se refinan antes del templado. El calentamiento en la zona de austenita puede repetirse una pluralidad de veces realizando el templado una pluralidad de veces, o el calentamiento en la zona de austenita puede repetirse una pluralidad de veces realizando normalización y templado.

45 Preferentemente, el enfriamiento forzado se inicia a la velocidad de enfriamiento mencionada anteriormente antes de que la temperatura en el último punto de enfriamiento alcance 600 °C o menos. En tal caso, es fácil aumentar aún más el límite elástico.

50 Como se describió anteriormente, el enfriamiento se puede realizar dos o más veces. En este caso, es suficiente que al menos un tratamiento de templado sea a alta temperatura. En el caso de realizar el templado una pluralidad de veces, preferentemente, después de templar y antes de realizar el templado en la siguiente etapa, se realiza un tratamiento SR como se describió anteriormente para eliminar el estrés residual generado por el templado.

55 Al realizar un tratamiento SR, la temperatura de tratamiento es 600 °C o menos. El tratamiento SR puede prevenir la aparición de grietas retrasadas después del templado. Si la temperatura de tratamiento es más de 600 °C, en algunos casos, los granos de austenita previos se vuelven gruesos después del templado final.

[Proceso de revenido]

60 El revenido se realiza después de realizar el templado descrito anteriormente. La temperatura de revenido se ajusta adecuadamente según la composición química del material de acero y el límite elástico que se intenta obtener. En otras palabras, en el caso del material de acero que tiene la composición química descrita anteriormente, el límite elástico del material de acero se puede ajustar a 860 MPa o más ajustando la temperatura de revenido.

65 Una temperatura de revenido preferente es de 650 °C al punto Aci. Si la temperatura de revenido es 650 °C o más, los carburos están suficientemente esferoidizados y la resistencia a SSC mejora aún más.

Un método para producir un tubo de acero se ha descrito como un ejemplo del método de producción mencionado

anteriormente. Sin embargo, el material de acero de la presente invención puede ser una placa de acero u otra forma, y un método para producir la placa de acero también incluye de manera similar un proceso de preparación, un proceso de trabajo en caliente, un proceso de templado y un proceso de revenido.

5 **Ejemplos**

[Método para producir material de prueba]

Se produjo acero fundido con un peso de 180 kg que tenía las composiciones químicas ilustradas en la Tabla 1.

10

[Tabla 1]

TABLA 1

Composición química (unidades de porcentaje en masa, el resto es Fe e impurezas)

Acero	Composición química (unidades de porcentaje en masa, el resto es Fe e impurezas)																	Eficaz						
	C	Si	Mn	P	S	A1	N	Cr	Mo	Co	Cu	Ni	Ti	Nb	V	B	Ca	Mg	Zr	REM	B	F1	F2	
1	0,51	0,30	0,45	0,020	0,003	0,029	0,004	0,85	0,32	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,70	1,8
2	0,52	0,31	0,40	0,015	0,001	0,032	0,004	1,20	0,75	0,15	-	-	0,012	0,013	-	-	-	-	-	-	-	0	0,95	1,2
3	0,51	0,28	0,42	0,016	0,001	0,032	0,003	0,45	1,35	1,45	-	-	0,011	0,015	0,070	-	-	-	-	-	-	0	0,71	4,2
4	0,52	0,35	0,30	0,015	0,001	0,028	0,002	1,25	1,05	1,71	-	-	0,012	0,025	0,100	0,0013	-	-	-	-	-	0,0025	1,02	3,6
5	0,56	0,33	0,40	0,017	0,002	0,030	0,003	0,28	1,75	1,95	-	-	0,010	0,025	0,060	0,0013	0,0010	-	-	-	-	0,0013	0,97	6,3
6	0,58	0,41	0,61	0,017	0,001	0,030	0,002	0,29	1,09	2,10	-	-	0,015	0,025	0,050	0,0013	-	0,0018	-	-	-	0,0032	0,87	4,3
7	0,53	0,19	0,35	0,013	0,002	0,037	0,003	0,56	1,21	1,18	0,03	0,04	0,012	0,040	0,110	0,0012	-	-	0,0012	-	-	0,0016	1,02	3,9
8	0,53	0,51	0,73	0,019	0,001	0,031	0,003	0,67	1,23	1,33	0,06	0,07	0,012	0,019	0,070	0,0013	0,0015	-	-	-	-	0,0017	1,08	2,4
9	0,61	0,28	0,35	0,017	0,002	0,038	0,003	1,10	1,50	2,20	0,03	-	0,012	0,040	0,060	0,0013	-	-	-	0,0015	-	0,0017	1,09	4,6
10	0,51	0,33	0,47	0,016	0,001	0,031	0,004	0,45	0,05	0,23	0,05	0,07	0,013	0,015	0,030	0,0015	0,0011	-	-	-	-	0,0014	0,91	1,2
11	0,51	0,36	0,45	0,016	0,001	0,035	0,004	1,00	1,20	0,03	0,02	0,04	0,014	0,043	-	-	-	-	-	-	-	0	1,02	1,2
12	0,53	0,34	1,20	0,017	0,002	0,032	0,003	1,00	0,73	1,15	-	-	0,015	0,040	0,080	0,0013	0,0015	-	-	-	-	0,0024	1,15	1,3
13	0,47	0,34	0,45	0,017	0,002	0,038	0,004	2,95	1,21	1,10	-	-	0,015	0,040	0,030	0,0013	0,0015	-	-	-	-	0,0016	1,45	1,4
14	0,52	0,35	0,30	0,015	0,001	0,028	0,002	0,45	0,40	2,45	-	-	0,012	0,025	0,100	0,0013	-	-	-	-	-	0,0025	0,60	6,9
15	0,52	0,35	0,71	0,015	0,001	0,028	0,002	1,75	0,32	0,55	-	-	0,012	0,025	0,100	0,0013	-	-	-	-	-	0,0025	1,23	0,9
16	0,51	0,30	0,41	0,013	0,001	0,036	0,003	1,00	0,70	5,05	-	-	0,012	0,015	0,095	0,0012	-	-	-	-	-	0,0016	0,35	7,8
17	0,26	0,25	0,44	0,012	0,002	0,037	0,004	1,03	0,68	-	-	-	0,008	0,030	0,100	0,0013	-	-	-	-	-	0	0,70	0,6
18	0,52	0,28	0,40	0,011	0,001	0,035	0,004	0,50	0,85	2,00	-	-	0,008	0,010	0,050	-	-	-	-	-	-	0	0,53	4,9
19	0,53	0,25	0,75	0,015	0,002	0,035	0,003	1,70	0,75	0,35	-	-	0,012	-	0,100	0,0013	-	-	-	-	-	0,0017	1,36	0,9
20	0,53	0,25	0,83	0,015	0,002	0,035	0,003	1,95	1,65	5,30	-	-	0,012	-	-	0,0013	-	-	-	-	-	0,0017	0,76	4,3
21	0,48	0,35	0,45	0,013	0,002	0,005	0,005	0,75	0,85	0,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0,77	2,0

ES 2 807 000 T3

Se produjeron lingotes usando el acero fundido descrito anteriormente. Los lingotes se laminaron en caliente para producir placas de acero. Los grosores de las placas de acero fueron los que se muestran en la Tabla 2.

[Tabla 2]

TABLA 2

Acero	Grosor de la placa laminada en caliente (mm)	Temperatura de templado (°C)	Medios de enfriamiento	Temperatura de revenido (°C)	YS (MPa)	TS (MPa)	Δ HR C	Determinación de la microestructura	Kissc (MPa/m)			
									1	2	3	Valor promedio
1	15	880	Inmersión en baño de aceite	670	865	960	1,5	Aprobado	27,8	28,1	27,5	27,8
2	15	900	Pulverización de agua nebulizada	670	875	963	1,2	Aprobado	27,3	28,5	27,1	27,6
3	15	910	Inmersión en baño de aceite	700	888	976	1,2	Aprobado	28,3	27,8	28,0	28,0
4	35	900	Pulverización de agua nebulizada	705	892	970	1,7	Aprobado	28,1	28,3	29,2	28,5
5	25	920	Inmersión en baño de aceite	700	915	984	1,5	Aprobado	28,1	27,8	28,2	28,0
6	20	930	Inmersión en baño de aceite	705	895	962	1,2	Aprobado	29,1	29,5	28,5	29,0
7	55	940	Pulverización de agua nebulizada	710	900	978	1,8	Aprobado	29,2	30,0	29,5	29,6
8	45	900	Pulverización de agua nebulizada	710	890	978	1,7	Aprobado	29,1	28,3	28,7	28,7
9	35	920	Pulverización de agua nebulizada	700	920	989	1,5	Aprobado	29,1	28,7	28,1	28,6
10	15	900	Pulverización de agua nebulizada	675	868	956	1,3	Aprobado	23,8	22,7	22,0	22,8
11	15	900	Pulverización de agua nebulizada	700	886	974	1,2	Aprobado	22,4	24,3	24,7	23,8
12	15	900	Inmersión en baño de aceite	700	890	975	1,1	Aprobado	23,2	23,1	21,3	22,5
13	15	920	Inmersión en baño de aceite	700	895	980	0,9	Aprobado	20,7	21,3	20,3	20,8

(continuación)

Acero	Grosor de la placa laminada en caliente (mm)	Temperatura de templado (°C)	Medios de enfriamiento	Temperatura de revenido (°C)	YS (MPa)	TS (MPa)	ΔHR C	Determinación de la microestructura	Kissc (MPa√m)			
									1	2	3	Valor promedio
14	25	920	Pulverización de agua nebulizada	700	875	956	2,6	Suspensio	26,4	23,7	24,0	25,1
15	15	920	Inmersión en baño de aceite	700	895	980	1,2	Aprobado	25,5	26,0	25,9	25,8
16	25	920	Pulverización de agua nebulizada	710	852	988	2,7	Suspensio	27,2	26,8	28,5	27,5
17	15	920	Inmersión en baño de aceite	710	808	888	1,4	Aprobado	22,8	22,6	22,8	22,7
18	25	920	Pulverización de agua nebulizada	710	865	990	2,6	Suspensio	24,2	25,0	25,5	24,9
19	15	920	Inmersión en baño de aceite	710	875	950	1,2	Aprobado	25,6	26,2	25,2	25,7
20	30	900	Pulverización de agua nebulizada	710	875	980	2,8	Suspensio	21,5	23,6	25,6	23,6
21	15	900	Inmersión en baño de aceite	700	882	950	1,1	Aprobado	25,5	26,5	25,5	25,8

Después del laminado en caliente, las placas de acero de los respectivos aceros se dejaron enfriar para llevar las temperaturas de la placa de acero a la temperatura normal. A continuación, las placas de acero se recalentaron para hacer que las temperaturas de la placa de acero fueran las temperaturas de templado (zona de austenita monofásica) mostradas en la Tabla 2, y se remojaron durante 20 minutos. Después de remojar, Las placas de acero se sumergieron en un baño de aceite y se templaron.

Después de templar, las placas de acero respectivas se sometieron a revenido a las temperaturas de revenido mostradas en la Tabla 2. En el revenido, la temperatura de revenido se ajustó para que las placas de acero se convirtieran en calidad de 125 ksi según lo especificado en los estándares API (límite de elasticidad de 862 a 960 MPa). El tiempo de retención a la temperatura de revenido fue de 60 minutos para cada placa de acero. Las placas de acero respectivas se produjeron mediante los procesos de producción anteriores.

[Prueba de límite elástico (YS) y resistencia a la tracción (TS)]

Se prepararon muestras de prueba de tracción de barra redonda que tienen un diámetro de 6,35 mm y una longitud paralela de 35 mm a partir de la parte central con respecto al grosor de la placa de acero de los números de prueba respectivos después del templado y revenido descritos anteriormente. La dirección axial de cada una de las muestras de prueba de tracción fue paralela a la dirección de laminado de las placas de acero. Se realizó una prueba de tracción en atmósfera a temperatura normal (25 °C) usando cada muestra de prueba de barra redonda, y se obtuvieron el límite elástico YS (MPa) y la resistencia a la tracción (TS) en las posiciones respectivas. Nótese que, en los presentes ejemplos, un punto de deformación menor obtenido mediante la prueba de tracción se definió como el límite elástico (YS) para cada número de prueba.

[Pruebas de evaluación]

[Prueba de determinación de microestructura]

Se realizó una prueba de dureza Rockwell (HRC) según JIS Z 2245 (2011) en cada placa de acero después del templado y revenido descritos anteriormente. Específicamente, la dureza Rockwell (HRC) se determinó en tres lugares arbitrarios en posiciones a una profundidad de 2,0 mm desde la superficie del material de acero, en posiciones a una profundidad de 2,0 mm desde la superficie posterior del material de acero (superficie interior en el caso de un tubo de acero), y en posiciones intermedias en la dirección del grosor del material de acero, respectivamente. Cuando la diferencia AHRC entre el valor máximo y el valor mínimo de la dureza Rockwell en los nueve puntos fue inferior a 2,0, se consideró que la relación en volumen de martensita revenida incluso en la posición de HRCmin fue 90 % o más, y se determinó que la placa de acero relevante pasó la prueba. Cuando la diferencia AHRC fue 2,0 o más, se consideró que la relación en volumen de martensita revenida en la posición de HRCmin fue inferior a 90 %, y se determinó que la placa de acero pertinente no pasó la prueba. Las determinaciones con respecto a aprobado o fallo se muestran en la Tabla 2.

[Prueba de DCB]

Usando cada placa de acero, se realizó una prueba de DCB según el Método D TM0177-96 de NACE y se evaluó la resistencia a SSC. Específicamente, tres de las muestras de prueba de DCB ilustradas en la FIG. 2A se extrajeron de una sección en el centro en el grosor de la pared de la placa de acero de cada número de prueba. Una cuña mostrada en la FIG. 2B se preparó además a partir de cada placa de acero. Un grosor t de la cuña fue de 3,10 mm. Tenga en cuenta que los números en la FIG. 2A y FIG. 2B indican longitud (unidades en "mm") de cada parte correspondiente.

La cuña se introdujo entre los brazos de la muestra de prueba de DCB. A continuación, la muestra de prueba de DCB en la que se introdujo la cuña se introdujo en un autoclave. Una solución líquida obtenida mezclando una solución salina desgasificada al 5 % y ácido acético y ajustándola a pH 2,7 se vertió en el autoclave para que quedara una parte de gas en el autoclave. A continuación, se cargó gas sulfuro de hidrógeno a 1 atm bajo presurización dentro del autoclave para agitar la fase líquida, y el gas sulfuro de hidrógeno a alta presión se saturó en la solución líquida.

Después de sellar el autoclave que se había sometido a los procesos descritos anteriormente, el autoclave se mantuvo durante 336 horas a 24 °C mientras se agitaba la solución líquida. Posteriormente, el autoclave se despresurizó y se extrajeron las muestras de prueba de DCB.

Se insertó un pasador en un orificio formado en la punta de los brazos de cada muestra de prueba de DCB que se sacó y se abrió una porción de muesca con una máquina de prueba de tracción, y se midió un esfuerzo P de liberación de cuña. Además, la muesca en la muestra de prueba de DCB se liberó en nitrógeno líquido, y se midió la longitud de propagación de grietas a durante la inmersión. La longitud de propagación de grietas a se midió visualmente utilizando calibradores de vernier. Un valor de tenacidad a la fractura $K_{I,SSC}$ (MPa \sqrt{m}) se determinó usando la expresión (4) basada en tensión P de liberación de cuña y la longitud de propagación de grietas a obtenidas. El valor de tenacidad a la fractura $K_{I,SSC}$ (MPa \sqrt{m}) se determinó para tres muestras de prueba de DCB de los respectivos aceros. El promedio de los tres valores de tenacidad a la fractura para los respectivos aceros se definió como el valor de tenacidad a la

fractura $K_{I\text{SSC}}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) del acero pertinente.
 [Expresión 1]

$$K_{I\text{SSC}} = \frac{Pa \left(2\sqrt{3} + 2,38 \frac{h}{a} \right) \left(\frac{B}{B_n} \right)^{1/\sqrt{3}}}{Bh^{3/2}} \quad (4)$$

5 En la expresión (4), h representa la altura (mm) de cada brazo de la muestra de prueba de DCB, B representa el grosor (mm) de la muestra de prueba de DCB, y B_n representa el grosor de la banda (mm) de la muestra de prueba de DCB. Estos se definen en el Método D TM0177-96 de NACE.

10 Los valores de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ obtenidos se muestran en la Tabla 2. Cuando el valor de $K_{I\text{SSC}}$ fue superior a $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, la resistencia a SSC se determinó como buena. Nótese que, la separación entre los brazos cuando se introdujo la cuña antes de la inmersión en el baño de prueba influye en el valor de $K_{I\text{SSC}}$. Por tanto, la medición real del espacio libre entre los brazos se realizó por adelantado utilizando un micrómetro, y también se confirmó que el espacio libre estaba dentro del intervalo de los estándares API.

15 [Resultados de la prueba]

Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla 2.

20 Las composiciones químicas de las placas de acero hechas de los aceros 1 a 9 fueron adecuadas y satisficieron la expresión (1) y expresión (2). Además, dado que AHRC fue menos de 2,0, las placas de acero pasaron la determinación de microestructura, y el 90 % o más en relación en volumen de la microestructura fue martensita revenida. Como resultado, el valor de $K_{I\text{SSC}}$ de cada uno de los aceros 1 al 9 fue superior a $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, indicando excelente resistencia a SSC.

25 Por otro lado, el contenido de Mo fue bajo en la placa de acero hecha de acero 10. Como resultado, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

30 El contenido de Co fue bajo en la placa de acero hecha de acero 11. Como resultado, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

El contenido de Mn fue alto en la placa de acero hecha de acero 12. Como resultado, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

35 El contenido de Cr fue alto en la placa de acero hecha de acero 13. Como resultado, el valor de $K_{I\text{SSC}}$ fue de $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

40 En la placa de acero hecha de acero 14, F1 fue menor que el límite inferior de la expresión (1). Por tanto, porque AHRC fue 2,0 o más, la placa de acero falló la determinación de microestructura, y la relación en volumen de martensita en la microestructura fue inferior a 90 %. Por tanto, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

45 En la placa de acero hecha de acero 15, F2 fue menor que el límite inferior de la expresión (2). Como resultado, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

50 En la placa de acero hecha de acero 16, El contenido de Co fue demasiado alto. Por tanto, porque AHRC fue 2,0 o más, la placa de acero falló la determinación de microestructura y la relación en volumen de martensita fue inferior a 90 %. Además, F1 fue menor que el límite inferior de la expresión (1). Como resultado, el límite elástico fue inferior a 860 MPa y, además, el valor de tenacidad a la fractura $K_{I\text{SSC}}$ fue $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja. Se considera que debido a que la placa de acero contenía una cantidad excesiva de Co, la templeabilidad disminuyó, y la resistencia y resistencia a SSC disminuyeron.

55 El contenido de C fue demasiado bajo en la placa de acero hecha de acero 17. Como resultado, el límite elástico fue inferior a 860 MPa. Además, la placa de acero no contenía Co, y F2 fue inferior al límite inferior de la expresión (2). Como resultado, el valor de $K_{I\text{SSC}}$ fue de $27,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ o menos y la resistencia a SSC fue baja.

5 En la placa de acero hecha de acero 18, F1 fue menor que el límite inferior de la expresión (1). Por tanto, porque AHRC fue 2,0 o más, la placa de acero falló la determinación de microestructura, y la relación en volumen de martensita en la microestructura fue inferior a 90 %. Por tanto, el valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} fue 27,5 MPa√m o menos y la resistencia a SSC fue baja.

En la placa de acero hecha de acero 19, F2 fue menor que el límite inferior de la expresión (2). Como resultado, el valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} fue 27,5 MPa√m o menos y la resistencia a SSC fue baja.

10 En la placa de acero hecha de acero 20, El contenido de Co fue demasiado alto. Por tanto, porque AHRC fue 2,0 o más, la placa de acero falló la determinación de microestructura y la relación en volumen de martensita fue inferior a 90 %. Como resultado, el límite elástico fue inferior a 860 MPa y, además, el valor de tenacidad a la fractura K_{ISSC} fue 27,5 MPa√m o menos y la resistencia a SSC fue baja. Se considera que debido a que la placa de acero contenía una cantidad excesiva de Co, la templabilidad disminuyó, y la resistencia y resistencia a SSC disminuyeron.

15 En la placa de acero hecha de acero 21, el contenido de Al fue demasiado bajo. Por tanto, la resistencia a SSC fue baja.

20 Una realización de la presente invención se ha descrito anteriormente. Sin embargo, la realización descrita anteriormente es simplemente un ejemplo para implementar la presente invención. Por tanto, la presente invención no está limitada a la realización descrita anteriormente, sino por el alcance de las reivindicaciones anexas.

Aplicabilidad industrial

25 El material de acero según la presente invención es ampliamente aplicable a materiales de acero utilizados en un entorno ácido, y preferentemente es utilizable como material de acero para pozos de petróleo que se utiliza en un entorno de pozos de petróleo, y más preferentemente es utilizable como acero de tubos de pozo de petróleo, tales como carcasa, tuberías y tubos de línea.

REIVINDICACIONES

1. Un material de acero que comprende una composición química que consiste en, en % en masa,

- 5 C: más de 0,45 a 0,65 %,
Si: 0,10 a 1,0 %,
Mn: 0,1 a 1,0 %,
P: 0,050 % o menos,
S: 0,010 % o menos,
10 Al Sol.: 0,01 a 0,1 %,
N: 0,01 % o menos,
Cr: 0,1 a 2,5 %,
Mo: 0,25 a 5,0 %,
Co: 0,05 a 5,0 %,

15 Cu: 0 a 0,50 %,
Ni: 0 a 0,50 %,
Ti: 0 a 0,030 %,
Nb: 0 a 0,15 %,
V: 0 a 0,5 %,

20 B: 0 a 0,003 %,
Ca: 0 a 0,004 %,
Mg: 0 a 0,004 %,
Zr: 0 a 0,004 %, y
metal de tierra rara: 0 a 0,004 %,

25 siendo el resto Fe e impurezas, y satisfaciendo las expresiones (1) y (2),
en donde la microestructura comprende, en relación en volumen, 90 % o más de martensita revenida:

$$C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 - Co/6 + \alpha \geq 0,70 \quad (1)$$

$$30 \quad (3C + Mo + 3Co)/(3Mn + Cr) \geq 1,0 \quad (2)$$

$$B \text{ eficaz} = B - 11(N - Ti/3,4)14 \quad (3)$$

- 35 donde, α en la expresión (1) es 0,250 cuando B eficaz, en % en masa, definido por la expresión (3) es 0,0003 % o más, y es 0 cuando B eficaz es menor que 0,0003 %,
donde, un contenido, en % en masa, de un elemento correspondiente se sustituye por cada símbolo de un elemento en la expresión (1) a la expresión (3).

40 2. El material de acero según la reivindicación 1, en donde la composición química contiene uno o más tipos de elemento seleccionados de un grupo que consiste en:

Cu: 0,02 a 0,50 %, y
Ni: 0,02 a 0,50 %.

45 3. El material de acero según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde la composición química contiene uno o más tipos de elemento seleccionados de un grupo que consiste en:

50 Ti: 0,003 a 0,030 %,
Nb: 0,003 a 0,15 %, y
V: 0,005 a 0,5 %.

55 4. El material de acero según una cualquiera de la reivindicación 1 a la reivindicación 3, en donde la composición química contiene:
B: 0,0003 a 0,003 %.

5. El material de acero según una cualquiera de la reivindicación 1 a la reivindicación 4, en donde la composición química contiene, en % en masa, uno o más tipos de elemento seleccionados de un grupo que consiste en:

60 Ca: 0,0003 a 0,004 %,
Mg: 0,0003 a 0,004 %,
Zr: 0,0003 a 0,004 %, y
metal de tierra rara: 0,0003 a 0,004 %.

65 6. Un tubo de acero para pozos de petróleo que comprende una composición química según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, una microestructura que comprende, en relación en volumen, 90 % o más de martensita revenida, y un grosor de pared de 15 mm o más.

FIG. 1

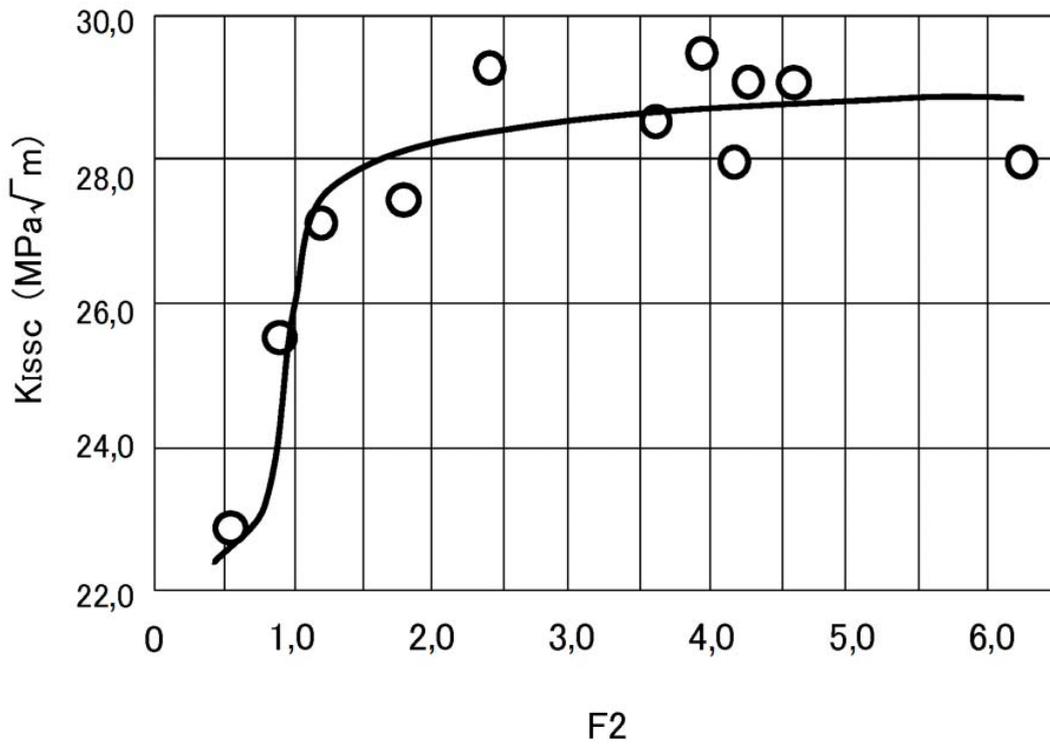


FIG. 2A

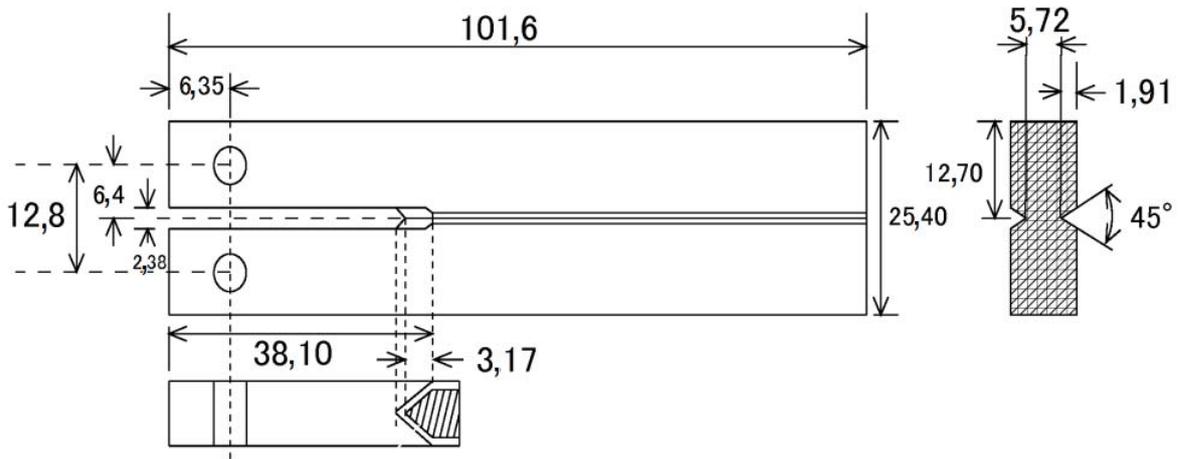


FIG. 2B

