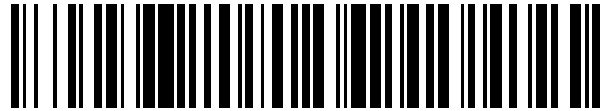


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 517 523**

51 Int. Cl.:

C22C 38/08 (2006.01)

C22C 38/44 (2006.01)

C22C 38/46 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.04.2013 E 13002083 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.10.2014 EP 2671963**

54 Título: **Pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia**

30 Prioridad:

06.06.2012 JP 2012129381

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

03.11.2014

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**SHINOZAKI, TOMOYA;
FUJITSUNA, NOBUYUKI;
YASUMOTO, YASUHIKO y
NOMURA, MASAHIRO**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 517 523 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

Pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia.

10 Antecedentes de la invención

10 Se requiere una alta resistencia para cigüeñales de grandes dimensiones y árboles intermedios que se usan para barcos o generadores de energía. En general, estos árboles se producen mediante piezas forjadas de acero. Hoy en día, además de una mejora adicional de la resistencia, también se requiere para estas piezas forjadas de acero de grandes dimensiones una tenacidad excelente, que por lo general tiene una relación de compensación recíproca con la resistencia.

15 Con el fin de mejorar la resistencia y la tenacidad de las piezas forjadas de acero, se han desarrollado (1) acero de alta resistencia para una pieza forjada de acero de grandes dimensiones en la que las composiciones de componentes están limitadas (consúltese la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2005-344149); (2) acero para pieza forjada que se fabrica mediante la limitación de las composiciones de componentes y la especificación de una estructura que incluye principalmente bainita y martensita (consúltese la patente de Japón con N° 3896365); (3) un cigüeñal que se fabrica mediante la limitación de las composiciones de componentes y la limitación de un tamaño de grano de la austenita anterior (consúltese la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2010-248540); (4) acero de refinado térmico a base de níquel que se fabrica mediante la especificación de una cantidad de aluminio sobre los límites de grano (consúltese la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2000-212705); (5) acero para pieza forjada que se fabrica mediante la especificación de unas concentraciones de magnesio y aluminio (consúltese la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2008-25021 y la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2009-173961); y (6) una pieza forjada que se fabrica mediante la especificación de una tasa de contenido de azufre, unas condiciones de forjado en caliente, y similares (consúltese la publicación de solicitud de patente no examinada de Japón con N° 2003-147436).

20 No obstante, incluso los aceros (1) a (3) que se han descrito en lo que antecede no pueden mostrar una resistencia suficiente debido a que puede que un tamaño de bloque y un tamaño de grano de la estructura formada no sean adecuados y, por lo tanto, la tenacidad y la resistencia a la fatiga no pueden mejorarse de una forma equilibrada. Además, el contenido en aluminio en el acero (4) que se ha descrito en lo que antecede es alto y, por lo tanto, pueden generarse inclusiones no metálicas y compuestos intermetálicos para deteriorar la tenacidad y la resistencia a la fatiga. Se dice que el acero (5) mejora la resistencia. No obstante, no se pretende que el acero (5) mejore la tenacidad. Se dice que la pieza forjada de acero (6) tiene una alta resistencia y una alta tenacidad. No obstante, la existencia de la cantidad previamente determinada de azufre genera inclusiones no metálicas tales como MnS, y, como resultado, la resistencia a la fatiga se deteriora. Tal como se ha descrito en lo que antecede, ninguna de las piezas forjadas de acero convencionales tiene una resistencia, una tenacidad y una resistencia a la fatiga mejoradas de una forma equilibrada.

45 Sumario de la invención

La presente invención se logra a la vista de los problemas que se han descrito en lo que antecede y el objeto de la presente invención es la provisión de una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que tiene una resistencia y una tenacidad sumamente equilibradas y que tiene una alta resistencia a la fatiga.

50 La invención para solucionar el problema que se ha descrito en lo que antecede es una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que incluye:

55 unas composiciones que incluyen
unas composiciones básicas que incluyen:

60 C: un 0,31 % en masa o más y un 0,5 % en masa o menos,
Si: un 0,02 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos,
Mn: un 0,1 % en masa o más y un 0,6 % en masa o menos,
Ni: un 2,6 % en masa o más y un 3,4 % en masa o menos,
Cr: un 0,8 % en masa o más y un 1,9 % en masa o menos,
Mo: un 0,25 % en masa o más y un 0,8 % en masa o menos,
V: un 0,05 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos, y
Al: un 0,005 % en masa o más y un 0,1 % en masa o menos, y
65 un resto que incluye Fe e impurezas inevitables;
donde un contenido en S como la impureza inevitable es de un 0,008 % en masa o menos; y

donde la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia consiste en una estructura martensítica o una estructura mixta de martensita y bainita;
 un tamaño de grano de la austenita anterior es de 19 μm o más y de 70 μm o menos; y
 un tamaño de bloque máximo de martensita es de 15 μm y un tamaño de bloque mínimo de martensita es de 0,5 μm o menos.

La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia tiene una resistencia y una tenacidad excelentes de una forma equilibrada y, además, proporciona una alta resistencia a la fatiga mediante la limitación de las composiciones y la estructura que se han descrito en lo que antecede tal como se ha descrito en lo que antecede y el ajuste del tamaño de grano de la austenita anterior y el tamaño de bloque dentro del intervalo que se ha descrito en lo que antecede.

En el presente caso, "de grandes dimensiones" en la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia quiere decir una pieza forjada de acero que tiene una parte esférica o una parte cilíndrica cuyo diámetro es 150 mm o más, una pieza forjada de acero que tiene una parte de tipo placa cuyo espesor es 150 mm o más, y una pieza forjada de acero que tiene un tamaño similar o un tamaño más grande.

Tal como se ha descrito en lo que antecede, la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia de la presente invención tiene una resistencia y una tenacidad excelentes de una forma equilibrada y, además, tiene una alta resistencia a la fatiga. Por esta razón, la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia puede usarse preferiblemente para cigüeñales de grandes dimensiones, árboles intermedios, y similares que se usan para barcos, generadores de energía, o similares.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una gráfica que ilustra una relación entre una relación x de una profundidad y una distancia desde una superficie hasta una parte central de una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia y una fracción de una estructura martensítica $f_m(x)$ (%);

la figura 2 es una gráfica que ilustra una relación entre un tamaño máximo de un bloque martensítico y la energía absorbida de Charpy que se mide mediante el uso de probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos;

la figura 3 es una gráfica que ilustra una relación entre la resistencia a la tracción y la energía absorbida de Charpy que se mide mediante el uso de las probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos;

la figura 4 es una gráfica que ilustra una relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga que se mide mediante el uso de las probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos;

la figura 5 es un mapa de figura de polos inversa de la probeta del ejemplo 4;

la figura 6 es un mapa de figura de polos inversa de la probeta del ejemplo 11;

la figura 7 es un mapa de figura de polos inversa de la probeta del ejemplo comparativo 3;

la figura 8 es un mapa de figura de polos inversa de la probeta del ejemplo comparativo 7;

la figura 9 es un mapa de figura de polos inversa de la probeta del ejemplo comparativo 9;

la figura 10 es un diagrama de TTT que se usa como condiciones de análisis en un ejemplo de análisis;

las figuras 11 son unas gráficas que ilustran la dependencia con la temperatura de cada propiedad física que se usan como las condiciones de análisis en el ejemplo de análisis;

las figuras 12 son unas gráficas que ilustran el comportamiento plástico en cada fase que se usan como las condiciones de análisis en el ejemplo de análisis;

la figura 13A es una gráfica que ilustra las condiciones de análisis A y B en el ejemplo de análisis y la figura 13B es una gráfica que ilustra los resultados de análisis; y

la figura 14A es una gráfica que ilustra una relación entre una profundidad de una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia y la dureza Brinell en el ejemplo de referencia y la figura 14B es una gráfica que ilustra una relación entre la profundidad y una fracción de estructura martensítica en el ejemplo de referencia.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

En lo sucesivo en el presente documento, se describirán con detalle realizaciones de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia de la presente invención.

<Composición>

La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia está constituida por unos componentes básicos que incluyen: C: un 0,31 % en masa o más y un 0,5 % en masa o menos, Si: un 0,02 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos, Mn: un 0,1 % en masa o más y un 0,6 % en masa o menos, Ni: un 2,6 % en masa o más y un 3,4 % en masa o menos, Cr: un 0,8 % en masa o más y un 1,9 % en masa o menos, Mo: un 0,25 % en masa o más y un 0,8 % en masa o menos, V: un 0,05 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos, y Al: un 0,005 % en masa o más y un 0,1 % en masa o menos, y un resto que incluye Fe e impurezas inevitables. La razón de la limitación de cada componente se describirá en lo sucesivo.

ES 2 517 523 T3

(C: un 0,31 % en masa o más y un 0,5 % en masa o menos)

5 El límite inferior del contenido en carbono (C) es un 0,31 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,33 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en carbono (C) es un 0,5 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 0,4 % en masa. El carbono (C) contribuye a mejorar la capacidad de endurecimiento y la resistencia. Un contenido en carbono que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a dificultades en la obtención de una capacidad de endurecimiento y una resistencia suficientes. A la inversa, un contenido en carbono que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a un extremo deterioro en la tenacidad y promueve la generación de una segregación "A" en un lingote de grandes dimensiones.

(Si: un 0,02 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos)

15 El límite inferior del contenido en silicio (Si) es un 0,02 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,06 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en silicio (Si) es un 0,2 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 0,16 % en masa. El silicio (Si) contribuye a la desoxidación y la mejora de la resistencia. Un contenido en silicio que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede proporcionar una demostración suficiente de este efecto. A la inversa, un contenido en silicio que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a una segregación "A" significativa y, por lo tanto, es difícil obtener un lingote puro.

(Mn: un 0,1 % en masa o más y un 0,6 % en masa o menos)

25 El límite inferior del contenido en manganeso (Mn) es un 0,1 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,3 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en manganeso (Mn) es un 0,6 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 0,45 % en masa. El manganeso (Mn) mejora la capacidad de endurecimiento y la resistencia. Un contenido en manganeso que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a dificultades en cuanto a la demostración del efecto que se ha descrito en lo que antecede. A la inversa, un contenido en manganeso que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede promueve una fragilización por revenido.

(Ni: un 2,6 % en masa o más y un 3,4 % en masa o menos)

35 El límite inferior del contenido en níquel (Ni) es un 2,6 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 2,8 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en níquel (Ni) es un 3,4 % en masa. El níquel (Ni) mejora la capacidad de endurecimiento, la resistencia y la tenacidad. Un contenido en níquel que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede proporcionar una demostración suficiente de este efecto. Un contenido en níquel que sea mayor que el límite superior da lugar a dificultades en la obtención de un tamaño adecuado de los granos de austenita anterior. Además, una cantidad de Ni usado, que es de alto precio, puede reducirse, y el coste de producción puede reducirse al ajustar el contenido en níquel menor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede.

(Cr: un 0,8 % en masa o más y un 1,9 % en masa o menos)

45 El límite inferior del contenido en cromo (Cr) es un 0,8 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 1,4 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en cromo (Cr) es un 1,9 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 1,65 % en masa. El cromo (Cr) mejora la capacidad de endurecimiento y la tenacidad. Un contenido en cromo que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede proporcionar una demostración suficiente del efecto que se ha descrito en lo que antecede. A la inversa, un contenido en cromo que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede promueve una segregación "A".

(Mo: un 0,25 % en masa o más y un 0,8 % en masa o menos)

55 El límite inferior del contenido en molibdeno (Mo) es un 0,25 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,4 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en molibdeno (Mo) es un 0,8 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 0,6 % en masa. El molibdeno (Mo) mejora la capacidad de endurecimiento, la resistencia y la tenacidad. Un contenido en molibdeno que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede proporcionar una demostración suficiente del efecto que se ha descrito en lo que antecede y promueve una segregación "A". A la inversa, un contenido en molibdeno que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede promueve una microsegregación y tiende a generar una segregación por gravedad.

(V: un 0,05 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos)

65 El límite inferior del contenido en vanadio (V) es un 0,05 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,07 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en vanadio (V) es un 0,2 % en masa y el contenido

superior es preferiblemente un 0,13 % en masa. La adición de una pequeña cantidad de vanadio (V) mejora de forma extrema la capacidad de endurecimiento y la resistencia. No obstante, el vanadio tiene un coeficiente de distribución de equilibrio pequeño y, por lo tanto, tiende a generar una microsegregación. Un contenido en vanadio que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede asegurar una resistencia suficiente. A la inversa, un contenido en vanadio que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede promueve la generación de una microsegregación.

(Al: un 0,005 % en masa o más y un 0,1 % en masa o menos)

El límite inferior del contenido en aluminio (Al) es un 0,005 % en masa y el contenido inferior es preferiblemente un 0,008 % en masa. Por otro lado, el límite superior del contenido en aluminio (Al) es un 0,1 % en masa y el contenido superior es preferiblemente un 0,03 % en masa. El aluminio (Al) se usa como un agente de desoxidación. Además, el aluminio genera unos compuestos finos tales como AlN, y este AlN termina el crecimiento de los granos y puede formar granos finos. Un contenido en aluminio que sea menor que el límite inferior que se ha descrito en lo que antecede no puede proporcionar una demostración suficiente de este efecto. A la inversa, un contenido en aluminio que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede puede generar óxidos y compuestos intermetálicos y puede deteriorar la tenacidad y la resistencia a la fatiga debido a que el aluminio forma enlaces con otros elementos tales como oxígeno.

Los componentes básicos de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia se han descrito en lo que antecede. Los componentes restantes son sustancialmente hierro (Fe). No obstante, pueden estar incluidas unas cantidades traza de impurezas inevitables (por ejemplo, S, O, P, Cu, Sn, N, y similares). Además, otros elementos pueden estar positivamente incluidos en un intervalo siempre que los elementos no proporcionen un efecto adverso al funcionamiento y el efecto de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia. Los ejemplos de estos otros elementos pueden incluir Ti, Ca y Mg. Desde el punto de vista de una reducción en la generación de inclusiones bastas, preferiblemente una cantidad total de las impurezas inevitables se controla hasta un 0,5 % en masa o menos.

(S: un 0,008 % en masa o menos)

El contenido en azufre (S) es un 0,008 % en masa o menos y preferiblemente un 0,003 % en masa o menos. El azufre (S), que forma MnS en la pieza forjada de acero, deteriora la resistencia a la fatiga cuando el contenido supera el límite superior que se ha descrito en lo que antecede. No obstante, en el ámbito industrial, el contenido nunca se vuelve un 0 % en masa.

Los contenidos de las otras impurezas inevitables son preferiblemente tal como sigue.

(O: un 0,0025 % en masa o menos)

El contenido en oxígeno (O) es preferiblemente un 0,0025 % en masa o menos y más preferiblemente un 0,002 % en masa o menos. El oxígeno (O) se une con diversos elementos para formar inclusiones no metálicas y, como resultado, deteriora la resistencia a la fatiga. En consecuencia, el contenido en oxígeno es preferiblemente el límite superior que se ha descrito en lo que antecede o menos. No obstante, en el ámbito industrial, el contenido nunca se vuelve un 0 % en masa.

(P: un 0,02 % en masa o menos)

El límite superior del contenido en fósforo (P) es preferiblemente un 0,02 % en masa o menos y más preferiblemente un 0,01 % en masa o menos. Un contenido en fósforo (P) que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a un deterioro en la ductilidad en caliente y tiende a generar grietas y otros defectos durante el forjado.

(Cu: un 0,1 % en masa o menos)

El límite superior del contenido en cobre (Cu) es preferiblemente un 0,1 % en masa o menos y más preferiblemente un 0,05 % en masa o menos. Un contenido en cobre (Cu) que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede tiende a generar grietas y otros defectos durante el forjado.

(Sn: un 0,03 % en masa o menos)

El límite superior del contenido en estaño (Sn) es preferiblemente un 0,03 % en masa o menos y más preferiblemente un 0,01 % en masa o menos. Un contenido en estaño (Sn) que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede puede dar lugar a un deterioro en la tenacidad.

(N: un 0,02 % en masa o menos)

El límite superior de un contenido en nitrógeno (N) es preferiblemente un 0,02 % en masa o menos y más preferiblemente un 0,01 % en masa o menos. Un contenido en nitrógeno (N) que sea mayor que el límite superior que se ha descrito en lo que antecede da lugar a un deterioro en la ductilidad en caliente y tiende a generar grietas y otros defectos durante el forjado.

5 <Estructura>

Posteriormente, se describirá la estructura de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia.

10 La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia consiste en una estructura martensítica o una estructura mixta de martensita y bainita. Tanto la resistencia como la tenacidad pueden satisfacerse de manera simultánea de una forma equilibrada mediante la formación de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que consiste en solo esos dos tipos de estructuras. La existencia de otras estructuras tales como ferrita y perlita en la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia no puede satisfacer de
15 manera simultánea tanto la resistencia como la tenacidad.

Un tamaño de grano de la austenita anterior en la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia (un tamaño promedio) es de 19 μm o más y de 70 μm o menos. El tamaño de grano de la austenita anterior afecta al tamaño de bloque. Un tamaño de grano basto de austenita anterior amplía el tamaño de bloque y no proporciona
20 una tenacidad suficiente. Como resultado, se determina que el límite superior del tamaño de grano de la austenita anterior es de 70 μm . A la inversa, un tamaño de grano demasiado fino que sea de menos de 19 μm da lugar a un deterioro en la capacidad de endurecimiento y da lugar a una contaminación con ferrita proeutectoide y, por lo tanto, el equilibrio entre la resistencia y la tenacidad se deteriora. El tamaño de grano de la austenita anterior puede medirse mediante un método que se describe en los ejemplos.

25 En un tamaño de bloque martensítico, que es una subestructura de la estructura martensítica que forma la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, un tamaño de bloque máximo del mismo es de 15 μm o menos y un tamaño de bloque mínimo del mismo es de 0,5 μm o más. El tamaño de bloque martensítico que se está determinando para ser el intervalo que se ha descrito en lo que antecede permite que la pieza forjada de acero mejore la resistencia, la tenacidad y la resistencia a la fatiga de una forma equilibrada. En particular, una reducción en este tamaño de bloque máximo a 15 μm o menos permite que la pieza forjada de acero muestre una tenacidad estable. Por otro lado, demasiada reducción en el tamaño de bloque aumenta la densidad de límite de grano y da un aumento en cuanto a la tasa de crecimiento de grietas. En consecuencia, se determina que el tamaño de bloque
30 mínimo es de 0,5 μm o más.

35 En la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, es preferible que una fracción de una estructura martensítica $f_m(x)$ (%), en la que una relación de una profundidad con respecto a una distancia desde una superficie hasta una parte central se define como x ($0 \leq x \leq 1$), sea

40 $f_m(x) = 100$, en la que $0 \leq x \leq 0,1$;
 $104 - 40x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,1 < x \leq 0,15$;
 $122 - 160x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,15 < x \leq 0,2$;
 $230 - 700x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,2 < x \leq 0,3$;
 $110 - 300x \leq f_m(x) \leq 112 - 40x$, en la que $0,3 < x \leq 0,35$;
45 $(22 - 20x) / 3 \leq f_m(x) \leq 105 - 20x$, en la que $0,35 < x \leq 50,5$;
 $(32 - 40x) / 3 \leq f_m(x) \leq 95$, en la que $0,5 < x \leq 0,8$; y
 $0 \leq f_m(x) \leq 95$, en la que $0,8 < x \leq 1$ (el intervalo (a) que se ilustra en la figura 1).

50 En el presente caso, una estructura restante es una estructura bainítica. Esta fracción de la estructura martensítica puede medirse mediante el uso de un método que se describe en los ejemplos, es decir, una regla de las mezclas que se obtiene de resultados de medición de dureza.

La "parte central" de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia quiere decir la posición más profunda con respecto a cada posición de la superficie. Por ejemplo, cuando la pieza forjada de acero de
55 grandes dimensiones de alta resistencia tiene una parte esférica, la parte central quiere decir el punto central de la parte esférica; cuando la pieza forjada tiene una parte cilíndrica, la parte central quiere decir el eje central de la parte cilíndrica; y cuando la pieza forjada tiene una parte de tipo placa, la parte central quiere decir el plano central que se encuentra a una distancia igual con respecto a ambas superficies. Una "distancia desde la superficie hasta la parte central" quiere decir una distancia en vertical desde cada parte de la superficie hasta la parte central. Por ejemplo,
60 cuando la pieza forjada tiene una parte esférica o una parte cilíndrica, la distancia desde la superficie hasta la parte central quiere decir un radio de la parte esférica o la parte cilíndrica, y cuando la pieza forjada tiene una parte de tipo placa, la distancia desde la superficie hasta la parte central quiere decir la mitad del espesor de la placa.

65 Un control de la fracción de estructura martensítica $f_m(x)$ en la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia tal como se ha descrito en lo que antecede posibilita reducir la generación de la totalidad del esfuerzo interno desde la superficie hasta el centro. Como resultado, el equilibrio entre la resistencia, la tenacidad y

la resistencia a la fatiga puede mejorarse adicionalmente.

5 Cuando la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia incluye una región de profundidad en la que una fracción de la estructura martensítica es menor que el intervalo que se ha descrito en lo que antecede, el esfuerzo de tracción puede permanecer en una región cerca de la superficie, en particular cerca de aproximadamente $x = 0,2$. Este esfuerzo de tracción residual da lugar a una reducción en la resistencia a la fatiga. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia se usa preferiblemente para un cigüeñal y similares. Un esfuerzo de flexión se aplica de forma repetida a una parte de chaflán de un cigüeñal y, por lo tanto, una alta resistencia a la fatiga se requiere, en particular, para la superficie de la parte de chaflán. El cigüeñal se acaba mediante procesamiento en máquina después del tratamiento térmico, de tal modo que se rectifica la capa superficial. Una reducción en el esfuerzo de tracción residual en el intervalo de una determinada profundidad con respecto a la superficie (aproximadamente $0 \leq x \leq 0,3$) puede proporcionar una resistencia a la fatiga más alta cuando la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia se usa para el cigüeñal y similares. Por otro lado, una fracción de la estructura martensítica que incluye una región de profundidad que supera el intervalo que se ha descrito en lo que antecede puede dar lugar a un aumento en el esfuerzo de transformación interno causado mediante temple y, por lo tanto, pueden tender a generarse grietas de temple.

En la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, es preferible que la fracción de la estructura martensítica $f_m(x)$ (%) sea

$$f_m(x) = 100, \text{ en la que } 0 \leq x \leq 0,1;$$

$$104 - 40x \leq f_m(x) \leq 100, \text{ en la que } 0,1 < x \leq 0,15;$$

$$122 - 160x \leq f_m(x) \leq 100, \text{ en la que } 0,15 < x \leq 0,2;$$

$$150 - 300x \leq f_m(x) \leq 100, \text{ en la que } 0,2 < x \leq 0,3;$$

$$105 - 150x \leq f_m(x) \leq 112 - 40x, \text{ en la que } 0,3 < x \leq 0,35;$$

$$105 - 150x \leq f_m(x) \leq 105 - 20x, \text{ en la que } 0,35 < x \leq 0,5;$$

$$80 - 100x \leq f_m(x) \leq 170 - 150x, \text{ en la que } 0,5 < x \leq 0,8; \text{ y}$$

$$0 \leq f_m(x) \leq 130 - 100x, \text{ en la que } 0,8 < x \leq 1,$$

con el fin de reducir adicionalmente la generación en la totalidad del esfuerzo interno desde la superficie hasta el centro (el intervalo (b) que se ilustra en la figura 1).

El ajuste de la fracción de la estructura martensítica al valor de límite inferior que se ha descrito en lo que antecede o más puede reducir adicionalmente la generación de un esfuerzo de tracción cerca de la superficie. Por otro lado, el ajuste de la fracción de estructura martensítica al valor de límite superior que se ha descrito en lo que antecede o menos puede reducir el esfuerzo de tracción interno y, por lo tanto, el riesgo de grieta de temple puede reducirse adicionalmente.

Con el fin de mejorar adicionalmente el funcionamiento y el efecto que se ha descrito en lo que antecede (una reducción en la generación de la totalidad del esfuerzo interno desde la superficie hasta el centro), es preferible que $d(f_m(x)) / dx \leq 0$, en la que $0 \leq x \leq 1$.

<Rendimiento, aplicación, y similares>

La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, que tiene las composiciones y la estructura que se ha descrito en lo que antecede, tiene tanto una resistencia como una tenacidad excelentes y tiene una alta resistencia a la fatiga. Esta resistencia (resistencia a la tracción) es preferiblemente 1.050 MPa o más, y más preferiblemente 1.080 MPa o más. La resistencia a la tracción quiere decir un valor que se mide de acuerdo con la norma JIS-Z2241 (1998).

La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia tiene una resistencia, una tenacidad y una resistencia a la fatiga excelentes tal como se ha descrito en lo que antecede y, por lo tanto, puede usarse preferiblemente para cigüeñales de grandes dimensiones y árboles intermedios que se usan para barcos o generadores de energía. En particular, con el fin de lograr una mejora de la potencia de salida y la formación de motores más pequeños de motores diesel para barcos o motores diesel para la generación de energía en tierra, por ejemplo, se requieren una resistencia a la fatiga y una resistencia a la tracción adicionales (por ejemplo, una resistencia a la tracción de 950 MPa o más) para cigüeñales de grandes dimensiones. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia puede satisfacer suficientemente estos requisitos.

<Método de fabricación>

Un método para fabricar la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia no está particularmente limitado. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia puede obtenerse mediante forjado y tratamiento térmico del acero ajustado en las composiciones que se han descrito en lo que antecede. En lo sucesivo en el presente documento, se describirá un ejemplo del método para fabricar la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que es un cigüeñal de tipo sólido que tiene un diámetro

de 150 mm o más.

En primer lugar, se funde un acero en el que unas composiciones de componentes previamente determinadas que se han descrito en lo que antecede se ajustan mediante el uso de un horno eléctrico, un horno de inducción de alta frecuencia, un convertidor de acero, y similares. A continuación de lo anterior, las impurezas (azufre, oxígeno, y similares) se retiran (se reducen) mediante refinado al vacío y similares. Después de que las impurezas se han retirado, un lingote se forma a partir de este acero mediante colada. Como un método para colada, se usa principalmente colada de lingotes. También puede usarse colada continua cuando se forma una pieza forjada de acero relativamente pequeña.

Posteriormente, se forja un material de barra redonda antes de formar un cigüeñal. Con el fin de forjar el acero dentro del intervalo de propiedad de deformación excelente del acero, la temperatura en esta operación es preferiblemente de 1.150 °C o más, y más preferiblemente de 1.200 °C o más. Una temperatura de calentamiento más baja da lugar a un aumento en el esfuerzo de deformación y una reducción en la eficiencia de fabricación. Un periodo de calentamiento es preferiblemente de 3 horas o más. Este periodo de calentamiento es esencial para igualar las temperaturas entre la superficie y el interior del lingote. En general, este periodo de calentamiento es proporcional al cuadrado de un diámetro de un objeto procesado. Por ejemplo, se determina que el periodo de calentamiento es de 3 horas o más en el momento de la fabricación del cigüeñal de grandes dimensiones que se ha descrito en lo que antecede.

Después de que el material de barra redonda se ha fabricado mediante forjado, el material de barra redonda se forja con forma de cigüeñal de tipo sólido. Este forjado se realiza preferiblemente mediante un método de forjado de Orientación de Grano Continua (CGF, *Continuous Grain Flow*). El método de forjado de CGF es un método en el que un lingote se forja y se procesa de tal modo que un centro de eje del lingote se vuelve un centro de la parte de eje del cigüeñal de tipo sólido y el lingote se forja de una manera integrada y se procesa de tal modo que una parte que tiende a deteriorar las propiedades mediante una segregación de línea central está incluida en la totalidad de una parte del centro de eje del cigüeñal de tipo sólido. Los ejemplos del método de forjado de CGF que se ha descrito en lo que antecede pueden incluir un método de forjado de RR y un método de forjado de TR. Estos métodos son preferibles debido a que las partes de alta pureza ocupan el lado superficial del cigüeñal de tipo sólido y, por lo tanto, tiende a obtenerse el cigüeñal de tipo sólido que tiene una resistencia y una propiedad frente a fatiga excelentes.

En lo sucesivo en el presente documento, el método de forjado se describirá usando el método de forjado de RR como un ejemplo.

En el forjado de RR, el material forjado obtenido se calienta a 1.150 °C o más durante 3 horas o más para formar en caliente cada codo de cigüeñal. Como un procedimiento específico, en primer lugar, el material de barra redonda que se obtiene mediante el procedimiento que se ha descrito en lo que antecede se procesa mediante una máquina para formar un material para un forjado de RR. A continuación de lo anterior, unos ejes de clavija, un par de partes de bloque y unos ejes de muñón, que son correspondientes con la formación de un cilindro, se calientan parcialmente y una fuerza vertical de una prensa se convierte en una fuerza en la dirección lateral mediante un mecanismo de cuña y, de ese modo, se forja un cilindro mediante la aplicación, de manera simultánea, de una fuerza de compresión en la dirección lateral y una fuerza excéntrica al material de RR. Mediante la repetición de esta operación en el número de cilindros requeridos, se forma un único cigüeñal. Con el fin de forjar el acero dentro del intervalo de propiedad de deformación excelente del acero, la temperatura en esta operación es preferiblemente de 1.150 °C o más, y más preferiblemente de 1.200 °C o más. Una temperatura de calentamiento más baja da lugar a un aumento en el esfuerzo de deformación y una reducción en la eficiencia de fabricación. Este periodo de calentamiento es esencial para igualar las temperaturas entre la superficie y el interior del lingote. Se determina que el periodo de calentamiento es de 3 horas o más en el momento de la fabricación del cigüeñal de grandes dimensiones que se ha descrito en lo que antecede.

Después del forjado de RR, la austenita (γ) retenida que está contenida en la pieza forjada puede descomponerse antes de que se realice el tratamiento de refinado térmico (tratamiento de temple y de revenido). Con el fin de formar una estructura más fina, se usa una transformación de fase durante el tratamiento de refinado térmico. En este momento, la γ retenida continúa existiendo durante el calentamiento en el tratamiento de refinado térmico hasta que la temperatura supera el punto de transformación de Ac1, cuando la γ retenida que existe después del forjado es estable. Esta γ retenida es la γ que permanece durante el forjado y el tratamiento térmico y tiene, originalmente, la misma orientación en la austenita anterior después del forjado. En consecuencia, una interfase entre la γ retenida no forma un límite de grano, cuando la transformación de γ avanza y la γ retenida se ponen en contacto entre sí. Como resultado, un tamaño de grano de γ después de la compleción de la transformación de γ es un tamaño de grano basto que es similar al tamaño de grano original de γ . En consecuencia, se realiza un tratamiento de descomposición de la γ retenida.

Un ejemplo del método para descomponer la austenita retenida incluye un método para un tratamiento de maduración en el que la pieza forjada se mantiene bajo calentamiento en el punto de transformación de Ac1 o menos (600 °C a 680 °C). En este tratamiento, el tiempo de calentamiento mantenido es de 5 horas o más y preferiblemente de 20 horas o más. Mediante tal tratamiento de maduración, la austenita retenida se descompone y

puede reducirse a un 1 % en volumen o menos. Para otro ejemplo del método para descomponer austenita retenida, puede usarse un tratamiento bajo cero.

5 Posteriormente, se realiza el tratamiento de refinado térmico (tratamiento de temple y de revenido). En primer lugar, la pieza forjada se calienta lentamente (una tasa de calentamiento de 30 °C / hora a 70 °C / hora) hasta el punto de transformación de Ac3 o más (840 °C a 940 °C) y se mantiene durante un determinado periodo (3 horas a 9 horas) antes del temple. Desde el punto de vista de una reducción en la formación de un grano de austenita anterior basto, el temple se realiza preferiblemente a una temperatura relativamente baja (840 °C a 940 °C) que es el punto de transformación de Ac3 o más tal como se ha descrito en lo que antecede. Un producto de grandes dimensiones, que genera una diferencia de temperatura entre una parte exterior y una parte interior del material durante el calentamiento, se calienta lentamente hasta una temperatura de calentamiento antes del temple y se mantiene durante un determinado periodo con el fin de igualar la temperatura entre la superficie y la parte interior del acero. El tiempo de mantenimiento requerido depende de un diámetro de un producto de acero. Cuanto más grandes sean las dimensiones del producto, mayor se volverá el tiempo de mantenimiento. En consecuencia, el siguiente temple se realiza después de que se haya tomado un tiempo de mantenimiento suficiente y la temperatura se iguala a la parte interior del producto de acero.

20 El temple se realiza usando un agente enfriante tal como una solución de aceite y de polímero y se obtiene la estructura martensítica o la estructura fabricada de martensita y bainita. Con el fin de obtener una estructura de este tipo, el temple se realiza a una tasa de enfriamiento promedio de 3 °C / minuto o más. Esta tasa de enfriamiento es más preferiblemente de 5 °C / minuto o más y de 100 °C / minuto o menos, y más preferiblemente de 10 °C / minuto o más y de 60 °C / minuto o menos.

25 En una pieza forjada de acero de grandes dimensiones, el temple con agua tiene un riesgo de generar grietas y, por lo tanto, se usan habitualmente temple con aceite y temple con polímero para el temple de un cigüeñal de grandes dimensiones. La tasa de enfriamiento en el momento del temple depende de un tamaño de una pieza forjada de acero. Una tasa de enfriamiento promedio entre 800 °C y 500 °C de un cigüeñal que tiene un diámetro de aproximadamente 500 mm es de aproximadamente 20 °C / minuto en el temple con aceite y de aproximadamente 50 °C / minuto en el temple con polímero. Un cigüeñal que tiene un diámetro más grande (por ejemplo, 1.000 mm) requiere una tasa de enfriamiento mucho más lenta.

30 Con el fin de satisfacer tanto la resistencia como la tenacidad de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, se requiere un control de la estructura martensítica o la estructura mixta de martensita y bainita. Como resultado de un estudio de las condiciones para lograr una estructura de este tipo incluso cuando una tasa de enfriamiento de temple para aplicar a un cigüeñal de grandes dimensiones que tiene un diámetro de 150 mm o más es de aproximadamente 20 °C / minuto (en el caso de temple con aceite), los inventores de la presente invención han conseguido determinar las composiciones de componentes químicos tal como se ha descrito en lo que antecede.

40 En el temple, la pieza forjada de acero se enfría hasta 200 °C o menos. Mediante un enfriamiento hasta 200 °C o menos tal como se ha descrito en lo que antecede, la transformación puede completarse totalmente. Un enfriamiento insuficiente da lugar a que permanezca austenita retenida no transformada, y esto da lugar a una fluctuación en las propiedades. Después del temple, preferiblemente la pieza forjada de acero se somete a revenido.

45 En el recocido, la pieza forjada de acero se calienta lentamente (una tasa de calentamiento 30 °C / hora a 70 °C / hora) hasta la temperatura previamente determinada (550 °C a 620 °C) y se mantiene durante un determinado periodo (5 horas a 20 horas). Con el fin de ajustar el equilibrio entre la resistencia y la tenacidad y de retirar el esfuerzo interno (esfuerzo residual) durante el temple, este recocido se realiza a 550 °C o más. No obstante, una temperatura demasiado alta del recocido da como resultado un reblandecimiento causado por la formación de carburos bastos y la recuperación de estructuras de dislocación y, por lo tanto, no puede asegurarse una resistencia suficiente. En consecuencia, se determina que la temperatura de recocido es de 620 °C o menos.

50 La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia puede obtenerse de la pieza forjada tratada con un refinado térmico tal como se ha descrito en lo que antecede al realizar adicionalmente un procesamiento en máquina de acabado que incluye el rectificado de por lo menos una parte de la superficie, si es necesario. El método para fabricar la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia de la presente invención no se limita al método de fabricación que se ha descrito en lo que antecede. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia también puede fabricarse mediante, por ejemplo, forjado libre. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia, que no sean cigüeñales de grandes dimensiones, puede obtenerse mediante un método similar de fabricación.

[Ejemplos]

65 En lo sucesivo en el presente documento, la presente invención se describirá con detalle adicional con referencia a los ejemplos. No obstante, la presente invención no se limita a estos ejemplos.

[Métodos de medición]

Cada medición en los ejemplos se realiza mediante los siguientes métodos.

5 1. Tamaño de grano (μm) de austenita anterior (γ)

De acuerdo con la norma ASTM (E112-96), el número de tamaño de grano se determinó mediante el método comparativo con el siguiente procedimiento y, a continuación de lo anterior, se calculó un tamaño de grano (un tamaño de grano nominal) de un grano de austenita anterior.

10 (1) Un número de tamaño de grano N correspondiente se determina mediante la comparación de una fotografía de 100 aumentos en la observación bajo un microscopio óptico y el diagrama convencional.

15 (2) El número de tamaño de grano N se determina de acuerdo con el número de granos n en un cuadrado de 25 mm de lado (625 mm^2 : campo microscópico) en la observación bajo un microscopio óptico de 100 aumentos, y puede establecerse la siguiente fórmula (1).

$$N = \frac{\log n}{0,301} + 1 \quad \dots \dots (1)$$

20 (3) Un tamaño de grano d (μm) puede calcularse mediante la siguiente fórmula (2) debido a que, en $62.500 \mu\text{m}^2$, posiblemente existen n granos

$$d(\mu\text{m}) = \sqrt{\frac{62500(\mu\text{m}^2)}{n}} \quad \dots (2)$$

25 En el presente caso, el tamaño de grano de la austenita anterior se midió en 10 lugares (10 campos microscópicos), y se calculó cada tamaño de grano promedio.

2. Tamaño de bloque martensítico (μm)

30 Se hace referencia a un grupo de listones, que es una subestructura de martensita, que tiene casi la misma orientación como bloque (un bloque martensítico). Una malorientación entre bloques es de 15° o más (límite de grano de ángulo elevado). En consecuencia, mediante el siguiente método, un tamaño de bloque martensítico (μm) se calculó a partir de un mapa de figura de polos inversa que se obtiene mediante el método de FESEM-EBSP.

35 (1) Se obtiene un mapa de figura de polos inversa mediante una medición de EBSP a unos intervalos de $0,3 \mu\text{m}$ en un campo microscópico de $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$.

(2) Las regiones que están rodeadas en una malorientación entre cristales adyacentes de 15° o más se especifican a partir del mapa de figura de polos inversa, y se determina cada área de las mismas.

40 (3) Un tamaño de bloque se determina mediante el cálculo de las raíces cuadradas de cada área ($\sqrt{\text{área}}$) que se ha descrito en lo que antecede.

El tamaño de bloque de martensita se midió en 10 lugares (10 campos microscópicos), y se determinaron un tamaño máximo y un tamaño mínimo en cada campo microscópico, y a continuación se determinó cada tamaño promedio (un promedio de tamaño máximo y un promedio de tamaño mínimo).

45 3. Propiedad de tracción (0,2 % límite de elasticidad: Y_S (MPa), Resistencia a la tracción: T_S (MPa), Alargamiento: (%), y Reducción en área: R_A (%))

Estas propiedades se midieron de acuerdo con la norma JIS-Z2241 (1998). La forma de la probeta era la forma de la probeta N° 14 que se ilustra en la norma JIS-Z2201 (1998), y su dimensión se ajustó a $\Phi 6 \times G. L. 30 \text{ mm}$.

50 4. Energía absorbida de Charpy: vE (J)

La energía absorbida de Charpy se midió de acuerdo con la norma JIS-Z2242 (2005). La forma de la probeta era la forma que tiene una entalla en V de 2 mm que se ilustra en la norma JIS-Z2242 (2005). Se probaron tres probetas en cada muestra y el valor promedio se determinó como la energía absorbida.

55 5. Resistencia a la fatiga F_S de flexión por rotación (MPa) y límite de durabilidad

60 Una prueba de resistencia a la fatiga de flexión por rotación se realizó de acuerdo con el siguiente método de prueba, y se evaluó la resistencia a la fatiga.

ES 2 517 523 T3

Probeta: Probetas lisas de 30 mm de Φ 10 mm \times G. L. (5 piezas)

Método de prueba: Flexión por rotación (Relación de esfuerzos = -1, Velocidad de rotación = 3.000 a 3.600 rpm)

Método de evaluación: Método escalonado (Incremento escalonado 20 MPa)

5 Resistencia a la fatiga [FS] = Esfuerzo de frenado (MPa) - Incremento escalonado (MPa)

Límite de durabilidad = Resistencia a la fatiga [FS] / Resistencia a la tracción [TS]

[Ejemplos 1 a 13 y ejemplos comparativos 1 a 14]

10 Los tipos de acero a a q que tienen unas composiciones que se muestran en la tabla 1 se produjeron a través de fusión. En el presente caso, “-” en la tabla 1 representa por debajo de los límites mensurables. Un lingote de setenta toneladas del tipo de acero a se coló mediante fusión en un horno eléctrico y mediante refinado en una cuchara. Se colaron unos lingotes de cuarenta kilogramos de cada uno de los tipos de acero b a q mediante fusión en un horno de inducción de alta frecuencia.

15

[Tabla 1]

Tipo de acero	Composición (% en masa)													
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Al	S	O	P	Cu	Sn	N
a	0,35	0,09	0,35	3,04	1,61	0,45	0,10	0,017	0,001	0,0012	0,008	0,03	0,001	0,0049
b	0,35	0,08	0,34	2,74	1,58	0,45	0,10	0,011	0,006	-	0,007	0,01	0,006	0,0054
c	0,35	0,08	0,34	3,23	1,57	0,46	0,10	0,016	0,007	-	0,007	0,01	0,006	0,0050
d	0,32	0,14	0,47	2,78	1,62	0,45	0,10	0,012	0,007	-	0,009	0,02	0,007	0,0048
e	0,32	0,16	0,46	3,22	1,59	0,48	0,10	0,008	0,007	-	0,010	0,01	0,007	0,0055
f	0,23	0,07	0,28	3,04	1,56	0,34	0,11	0,003	0,004	0,0013	0,003	0,01	0,001	0,0040
g	0,32	0,24	0,43	3,29	1,62	0,45	0,10	0,012	0,007	-	0,010	0,02	0,006	0,0051
h	0,34	0,21	1,00	3,01	1,61	0,50	0,10	0,037	0,007	-	0,010	0,01	0,007	0,0053
i	0,345	0,05	0,32	1,61	1,51	0,50	0,15	0,044	0,005	-	0,004	0,01	0,008	0,005
j	0,32	0,07	0,32	3,72	1,66	0,38	0,10	-	0,008	-	0,007	-	-	-
k	0,35	0,25	0,95	3,04	0,21	0,50	0,11	0,025	0,006	-	0,007	0,01	0,007	0,0063
l	0,38	0,21	1,04	3,05	3,01	0,52	0,14	0,008	0,006	-	0,005	0,01	0,006	0,0072
m	0,35	0,26	1,01	2,98	1,62	0,50	<0,01	0,020	0,007	-	0,010	0,03	0,008	0,0064
n	0,35	0,19	0,28	1,61	1,61	0,51	0,15	0,027	0,005	-	0,004	0,01	0,008	0,0050
o	0,33	0,27	0,64	1,63	1,63	0,25	0,15	0,004	0,002	-	0,007	0,03	0,001	0,0058
p	0,40	0,24	0,97	0,41	1,97	0,27	0,08	0,003	0,003	0,0009	0,006	0,03	0,007	0,0054
q	0,33	0,30	0,43	0,17	3,01	0,47	0,078	0,028	0,0005	-	0,007	0,03	0,001	0,0064

El lingote (70 toneladas) del tipo de acero a se forjó en caliente para formar unas piezas forjadas con forma de barra redonda con un diámetro de 500 mm. Los tipos de acero b a q se forjaron a un tamaño de 90 mm × 90 mm × 600 mm y, a continuación de lo anterior, se enfriaron en la atmósfera. Cada pieza forjada de los tipos de acero a a q se enfrió hasta la temperatura ambiente y, a continuación de lo anterior, una pieza pequeña con un tamaño de 20 mm × 20 mm × 180 mm se recortó de cada pieza forjada. Cada pieza pequeña se trató térmicamente en las condiciones que se muestran en la tabla 2 que simulaban un proceso de forjado de un cigüeñal, y cada una de las piezas pequeñas tratadas se enfrió en el horno para preparar probetas.

5

10 A continuación de lo anterior, el tratamiento de refinado térmico (tratamiento de temple y de revenido) se realizó para cada probeta con el fin de asegurar la resistencia del cigüeñal. El tratamiento de temple se realizó en unas condiciones de temple que simulaban una tasa de calentamiento y de enfriamiento de un cigüeñal con un diámetro de 500 mm. En concreto, el tratamiento de temple se realizó de una forma que, usando un horno pequeño de simulación, la temperatura se elevó hasta de 870 °C a 940 °C a una tasa de calentamiento de 40 °C / hora y esta temperatura se mantuvo durante de 3 horas a 8 horas y, a continuación de lo anterior, las probetas se enfriaron de tal modo que una tasa de enfriamiento promedio en un intervalo de temperaturas de 870 °C a 500 °C era de 20 °C / minuto a 50 °C / minuto. En el tratamiento de revenido, las probetas se mantuvieron a una temperatura de 15 560 °C a 610 °C durante 13 horas y se enfriaron en el horno (las condiciones de tratamiento para cada probeta se muestran en la tabla 2). Las probetas (piezas forjadas de acero) de los ejemplos 1 a 13 y los ejemplos comparativos 20 1 a 14 se obtuvieron mediante los métodos tal como se ha descrito en lo que antecede.

[Tabla 2]

	Tipo de acero	Condiciones de calentamiento para forjado		Condiciones de tratamiento térmico				
		Condiciones de temple		Condiciones de recocido				
		Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Tasa de enfriamiento (°C/min)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)
ejemplo 1	a	1280	9	870	3	20	560	13
ejemplo 2	a	1280	9	870	3	20	580	13
ejemplo 3	a	1280	3	870	8	50	590	13
ejemplo 4	a	1310	3	870	8	50	580	13
ejemplo 5	a	1280	9	870	3	50	580	13
ejemplo 6	a	1280	9	870	3	50	600	13
ejemplo 7	a	1280	9	870	3	50	610	13
ejemplo 8	a	1280	9	920	3	50	590	13
ejemplo 9	a	1280	9	940	3	50	580	13
ejemplo 10	b	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo 11	c	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo 12	d	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo 13	e	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo comparativo 1	f	1230	3	870	3	20	590	13
ejemplo comparativo 2	g	1230	3	870	3	20	580	13
ejemplo comparativo 3	h	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo comparativo 4	i	1280	3	870	3	20	580	13
ejemplo comparativo 5	J	1280	3	870	3	20	580	13

	Tipo de acero	Condiciones de calentamiento para forjado				Condiciones de temple				Condiciones de tratamiento térmico		
		Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Temperatura (°C)	Tasa de enfriamiento (°C / min)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Condiciones de recocido		
										Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	
ejemplo comparativo 6	k	1280	3	870	3	20	580	13				
ejemplo comparativo 7	l	1280	3	870	3	20	580	13				
ejemplo comparativo 8	m	1280	3	870	3	20	580	13				
ejemplo comparativo 9	n	1280	3	870	3	50	600	13				
ejemplo comparativo 10	o	1200	1	870	3	20	580	13				
ejemplo comparativo 11	o	1200	1	870	3	20	610	13				
ejemplo comparativo 12	p	1200	1	870	3	20	580	13				
ejemplo comparativo 13	p	1200	1	870	3	20	610	13				
ejemplo comparativo 14	q	1200	1	870	3	20	590	13				
ejemplo comparativo 15	a	1280	9	960	3	20	610	13				
ejemplo comparativo 16	a	1280	9	1050	3	20	612	13				
ejemplo comparativo 17	b	1230	3	960	3	20	580	13				

5 Se observó cada estado de las microestructuras (estructuras martensíticas (M) o estructuras bainíticas (B)) de las probetas en el ejemplo 1 a 13 y el ejemplo comparativo 1 a 14. Además, el tamaño de grano de la austenita anterior, el tamaño de bloque martensítico, las propiedades de tracción, la energía absorbida de Charpy, y las propiedades frente a fatiga (la resistencia a la fatiga FS y el límite de durabilidad) se evaluaron mediante el método de medición que se ha descrito en lo que antecede. El resultado de medición se muestra en la tabla 3.

En el presente caso, “-” en la tabla 3 representa que la propiedad no se midió.

[Tabla 3]

	Estructura						Propiedad								Evaluación exhaustiva		
	Microestructura e	Tamaño de grano de y anterior		Tamaño de bloque mínimo (µm)	Tamaño de bloque máximo (µm)	Figura relacionada	Evaluación de estructura	de tracción				Charpy		Fatiga			
		Mínimo (µm)	Máximo (µm)					TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	Evaluación	vE (J)	evaluación de vE	FS (MPa)		Límite de durabilidad	
ejemplo 1	M	26	53	-	-	-	○	1084	1202	16,0	61,3	○	71	○	-	-	○
ejemplo 2	M	26	53	-	-	-	○	1014	1130	163	61,6	○	123	○	524	0,464	○
ejemplo 3	M	19	37	-	-	-	○	1052	1153	156	604	○	108	○	-	-	○
ejemplo 4	M	26	53	05	105	figura 5	○	1103	1195	130	51,1	○	85	○	562	0470	○
ejemplo 5	M	26	44	-	-	-	○	1097	1206	172	6369	○	102	○	-	-	○
ejemplo 6	M	26	44	-	-	-	○	1047	1153	17,4	65,6	○	111	○	-	-	○
ejemplo 7	M	26	44	-	-	-	○	946	1058	157	67,3	○	125	○	563	0,532	○
ejemplo 8	M	37	63	-	-	-	○	1000	1102	159	584	○	126	○	-	-	○
ejemplo 9	M	44	63	-	-	-	○	1019	1101	171	65,5	○	132	○	-	-	○
ejemplo 10	B + M	44	63	-	-	-	○	1005	1143	163	621	○	59	○	-	-	○
ejemplo 11	M	53	63	0,5	13,5	figura 6	○	1073	1191	170	60,8	○	64	○	-	-	○
ejemplo 12	B + M	37	62	-	-	-	○	931	1064	185	63,1	○	75	○	-	-	○
ejemplo 13	M	53	63	-	-	-	○	938	1066	17,3	615	○	76	○	-	-	○
ejemplo comparativo 1	B	26	53	-	-	-	○	891	1015	165	612	×	113	○	-	-	resistencia insuficiente
ejemplo comparativo 2	M	44	125	-	-	-	×	976	1118	165	61,0	○	29	×	-	-	tenacidad insuficiente
ejemplo comparativo 3	M	105	250	05	24,5	figura 7	×	943	1072	14,1	48,4	○	20	×	-	-	tenacidad insuficiente

	Estructura						Propiedad						Evaluación exhaustiva					
	Microestructura	Tamaño de grano de y anterior		Tamaño de bloque mínimo (µm)	Tamaño de bloque máximo (µm)	Figura relacionada	Evaluación de estructura	de tracción				Charpy		Fatiga				
		Mínimo (µm)	Máximo (µm)					YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	Evaluación		vE (J)	VE evaluación de vE	FS (MPa)	Límite de durabilidad	
ejemplo comparativo 4	M	22	44	-	-	-	○	1047	1172	136	554	○	29	×	-	-	tenacidad insuficiente	×
ejemplo comparativo 5	M	44	88	-	-	-	×	tamaño de grano insuficiente									×	
ejemplo comparativo 6	B	26	63	-	-	-	○	939	1067	173	58,7	○	23	×	-	-	tenacidad insuficiente	×
ejemplo comparativo 7	M	149	250	05	20,5	figura 8	×	1000	1149	13,3	48,7	○	42	×	-	-	tenacidad insuficiente	×
ejemplo comparativo 8	M	31	74	-	-	-	×	887	1029	184	636	×	77	○	-	-	resistencia insuficiente	×
ejemplo comparativo 9	B + M	19	149	05	175	figura 9	×	1034	1136	16,1	59,4	○	42	×	-	-	tenacidad insuficiente	×
ejemplo comparativo 10	B	26	63	-	-	-	○	966	1103	17,0	56,9	○	34	×	-	-	tenacidad insuficiente	×

	Estructura						Propiedad						Evaluación exhaustiva					
	Microestructura	Tamaño de grano de y anterior		Tamaño de bloque mínimo (µm)	Tamaño de bloque máximo (µm)	Figura relacionada	Evaluación de estructura	de tracción			Charpy				Fatiga			
		Mínimo (µm)	Máximo (µm)					YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	RA (%)	Evaluación			vE (J)	evaluación de vE	FS (MPa)	Límite de durabilidad
ejemplo comparativo 11	B	26	63	-	-	-	○	833	963	182	65,1	x	56	○	458	0476	resistencia insuficiente	x
ejemplo comparativo 12	B	26	37	-	-	-	○	919	1078	16,3	603	○	19	x	-	-	tenacidad insuficiente	x
ejemplo comparativo 13	B	26	37	-	-	-	○	805	964	182	652	x	64	○	465	0,482	resistencia insuficiente	x
ejemplo comparativo 14	B	26	44	-	-	-	○	857	1012	16,1	63,5	x	45	x	-	-	resistencia y tenacidad insuficientes	x
ejemplo comparativo 15	M	63	177	-	-	-	x	980	1095	12,1	43,8	○	25	x	-	-	tenacidad insuficiente	x
ejemplo comparativo 16	M	88	250	-	-	-	x	987	1143	12,6	33,4	○	17	x	-	-	tenacidad insuficiente	x
ejemplo comparativo 17	B + M	63	105	-	-	-	x	1093	1201	152	48	○	22	x	-	-	tenacidad insuficiente	x

La figura 2 ilustra una relación entre un tamaño máximo del bloque martensítico y la energía absorbida de Charpy que se mide mediante el uso de las probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos. La figura 3 ilustra una relación entre la resistencia a la tracción y la energía absorbida de Charpy que se mide mediante el uso de las probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos. La figura 4 ilustra una relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga que se mide mediante el uso de las probetas de los ejemplos y los ejemplos comparativos.

Se ilustran mapas de figura de polos inversa de las probetas del ejemplo 4, el ejemplo 11, el ejemplo comparativo 3, el ejemplo comparativo 7 y el ejemplo comparativo 9, respectivamente, en la figura 5, la figura 6, la figura 7, la figura 8 y la figura 9.

[Análisis]

Los ejemplos 1 a 13, en los que tanto las composiciones como las condiciones de fabricación de los aceros satisfacen los requisitos de la presente invención, proporcionaron unas piezas forjadas de acero con unas propiedades deseadas. Los ejemplos comparativos 1 a 14, en los que las composiciones de los aceros no satisficieron los requisitos de la presente invención, no proporcionaron a las piezas forjadas de acero unas propiedades deseadas. Los ejemplos comparativos 15 a 17, en los que, a pesar de que las composiciones de los aceros satisficieron los requisitos de la presente invención, el tamaño de grano de la austenita anterior no satisfizo los requisitos de la presente invención debido a una temperatura de temple inadecuada, no proporcionaron a las piezas forjadas de acero unas propiedades deseadas.

Tal como se ilustra en la figura 2, se halla que un tamaño de bloque máximo de martensita de 15 μm o menos proporciona una tenacidad (energía absorbida de Charpy) excelente. Tal como se ilustra en la figura 3, se halla que el acero de alta resistencia para la pieza forjada de acero de grandes dimensiones tiene una tenacidad (una propiedad frente a impacto) excelente incluso cuando el acero de alta resistencia para la pieza forjada de acero de grandes dimensiones tiene una resistencia más alta (una resistencia de 1.050 MPa o más) que la resistencia del acero convencional. En general, un material que tiene una resistencia más alta tiene una tenacidad más baja. No obstante, puede proporcionarse una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que tiene una resistencia y una tenacidad excelentes de una forma equilibrada (por ejemplo, una resistencia de 1.050 MPa o más) mediante la optimización de los componentes químicos y las estructuras de metal.

La figura 4 ilustra una relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga. La resistencia a la fatiga de la pieza forjada de acero de la presente invención aumenta aproximadamente un 10 % o más en comparación con la del acero convencional. El límite de durabilidad (= resistencia a la fatiga / resistencia a la tracción) es igual al del acero convencional, y se mantiene la relación proporcional entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga. Dicho de otra forma, no se observa un aumento en la sensibilidad de entalla asociada con una resistencia más alta.

[Ejemplo de análisis]

Un análisis de transferencia de calor y de esfuerzo térmico para el esfuerzo de transformación en un acero mediante temple se realizó usando el soporte lógico de propósito general FORGE 2009. Las condiciones específicas son tal como sigue. Suponiendo una forma de barra redonda, el modelado se realizó mediante el uso de un modelo axisimétrico bidimensional. En una dirección de eje, el modelado se realizó en solo una unidad de longitud, y se determinó que la superficie superior y la superficie inferior eran un estado adiabático. El análisis de transferencia de calor y de esfuerzo térmico se realizó en unas condiciones en las que la temperatura inicial se ajustó de manera uniforme a 870 °C y la temperatura se enfrió hasta aproximadamente temperatura ambiente. Cada propiedad de material que se usa en el análisis se ilustra en las figuras 10 a 12. Las siguientes condiciones de análisis A y B se usaron en el análisis.

(Condiciones de análisis A)

Tal como se ilustra mediante una línea de trazos en la figura 13A, una fracción de estructura en el acero de barra redonda en la que un 100 % de la estructura martensítica existe en una relación de una profundidad con respecto a una distancia desde la superficie hasta la parte central de 0 a 0,35 y un 95 % de la estructura martensítica y un 5 % de la estructura bainítica existen en la parte central.

(Condiciones de análisis B)

Tal como se ilustra mediante una línea continua en la figura 13A, una fracción de estructura en el acero de barra redonda en la que un 100 % de la estructura martensítica existe en una relación de una profundidad con respecto a una distancia desde la superficie hasta la parte central de 0 a 0,1 y un 100 % de la estructura bainítica existe en la parte central.

Los resultados de análisis en las condiciones de análisis A y B se ilustran en la figura 13B. Tal como se ilustra en esta figura 13B, las condiciones de análisis A dan como resultado un esfuerzo de transformación interno más grande. Las condiciones de análisis B dan lugar a un esfuerzo residual en una posición en una relación de profundidad de aproximadamente 0,2. Una fracción de estructura entre las condiciones de análisis A y B posibilita controlar la totalidad del esfuerzo interno desde la superficie hasta el centro con bajo esfuerzo.

[Ejemplo de referencia 1]

Un lingote de setenta toneladas del tipo de acero a que tiene unas composiciones de componentes que se muestran en la tabla 1 que se ha descrito en lo que antecede se coló mediante fusión en un horno eléctrico y mediante refinado en una cuchara. El lingote (70 toneladas) del tipo de acero a se forjó en caliente mediante una prensa de forjado libre para formar unas piezas forjadas con forma de barra redonda con un diámetro de 500 mm (un radio de 250 mm) y, a continuación de lo anterior, la barra redonda se enfrió en la atmósfera. Las piezas forjadas de barra redonda se trataron con un calor de 1.280 °C durante 3 horas, lo que simulaba el calentamiento antes del forjado de RR. Antes del tratamiento de temple y de revenido, se realizó un tratamiento de maduración para las piezas forjadas de barra redonda (manteniéndose a una temperatura de 650 °C durante 20 horas), y las piezas forjadas con forma de barra redonda se enfriaron hasta la temperatura ambiente. Las condiciones de temple eran tal como sigue. Las piezas forjadas de barra redonda se calentaron a una tasa de calentamiento de 40 °C / hora y se mantuvieron a 870 °C durante 8 horas y, a continuación de lo anterior, se realizó un temple con polímero. A continuación de lo anterior, las piezas forjadas de barra redonda se mantuvieron a 580 °C durante 15 horas como el tratamiento de revenido y se enfriaron en el horno hasta 350 °C y, a continuación de lo anterior, las piezas forjadas de barra redonda se enfriaron con aire hasta la temperatura ambiente para obtener una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia del ejemplo de referencia 1.

La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia obtenida se rectificó de tal modo que una parte de cada profundidad en una dirección desde la superficie hasta el centro (25 mm, 40 mm, 70 mm, 100 mm, 130 mm, 160 mm, 190 mm, 220 mm y 250 mm) forma una superficie. Se midieron la dureza Brinell HB, resistencia a la tracción (MPa), la fracción de estructura (%) y el tamaño de grano de austenita anterior (γ) (μm) en cada profundidad. La resistencia a la tracción de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia en el ejemplo de referencia 1 es un valor convertido que se calcula a partir de la dureza Brinell HB medida de acuerdo con la tabla de conversión de durezas (SAE J 417). Los métodos para medir y calcular la dureza Brinell y una fracción de una estructura martensítica son tal como sigue. El resultado de medición se muestra en la tabla 4 junto con unas condiciones de tratamiento de calentamiento en el momento de la fabricación.

Dureza Brinell

La dureza Brinell se midió de acuerdo con la norma JIS-Z2243 (2008).

Fracción de estructura martensítica (%)

La fracción de estructura martensítica se calculó a partir del resultado de medición de la dureza (dureza Brinell: HB) usando la siguiente fórmula que se obtiene de la regla de las mezclas. Estructuras que no sean la estructura martensítica se determinaron como la estructura bainítica, y también se calculó una fracción de estructura bainítica (%).

$$HB = HB_M \times f_m(x) / 100 + HB_B \times (1 - f_m(x) / 100)$$

$f_m(x)$: Fracción de estructura martensítica (%)

HB_M : dureza Brinell de la martensita

(Valor medido real de la parte de martensita completa: 368)

HB_B : dureza Brinell de la bainita

(Valor medido real de la parte de bainita completa: 352)

[Tabla 4]

	Tipo de acero	Condiciones de calentamiento para forjado		Condiciones de tratamiento térmico							Posición		Propiedades		Estructura		Tamaño de grano de y anterior (µm)	
				Condiciones de tratamiento de maduración		Condiciones de temple			Condiciones de recocido				dureza Brinell HB	Resistencia a la tracción (Valor convertido) (MPa)	Fracción de estructura			
		Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Temperatura (°C)	Tiempo de mantenimiento (h)	Medio de enfriamiento	Temperatura	Tiempo de mantenimiento (h)	Profundidad (mm)	Relación (x)			martensita	bainita		
Ejemplo de referencia 1	A	1.280	3	650	20	870	8	Solución de polímero	580	15	25	0,10	368	1.130	100 %	0 %	35	
											40	0,16	368	1.130	100 %	0 %	31	
											70	0,28	367	1.127	94 %	6 %	35	
											100	0,40	365	1.121	81 %	19 %	DESC	
											130	0,52	361	1.109	56 %	44 %		
											160	0,64	358	1.100	38 %	62 %		44
											190	0,76	356	1.094	25 %	75 %		41
											220	0,88	352	1.083	0 %	100 %		45
250	1,00	352	1.083	0 %	100 %	43												

5 Una relación entre cada profundidad y la dureza Brinell de la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia en el ejemplo de referencia 1 se ilustra en la figura 14A y una relación entre cada profundidad y una fracción de una estructura martensítica se ilustra en la figura 14B.

10 Una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia de la presente invención tiene tanto una resistencia como una tenacidad excelentes, y tiene una alta resistencia a la fatiga. En consecuencia, la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia puede usarse preferiblemente para cigüeñales de grandes dimensiones y árboles intermedios que se usan para barcos o generadores de energía.

REIVINDICACIONES

1. Una pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia que comprende:

5 unas composiciones que comprenden
unas composiciones básicas que comprenden:

10 C: un 0,31 % en masa o más y un 0,5 % en masa o menos,
Si: un 0,02 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos,
Mn: un 0,1 % en masa o más y un 0,6 % en masa o menos,
Ni: un 2,6 % en masa o más y un 3,4 % en masa o menos,
Cr: un 0,8 % en masa o más y un 1,9 % en masa o menos,
Mo: un 0,25 % en masa o más y un 0,8 % en masa o menos,
15 V: un 0,05 % en masa o más y un 0,2 % en masa o menos, y
Al: un 0,005 % en masa o más y un 0,1 % en masa o menos, y
un resto que comprende Fe e impurezas inevitables;
donde un contenido en S como la impureza inevitable es de un 0,008 % en masa o menos; y
donde la pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia consiste en una estructura
20 martensítica o una estructura mixta de martensita y bainita;
un tamaño de grano de la austenita anterior es de 19 μm o más y de 70 μm o menos; y
un tamaño de bloque máximo de martensita es de 15 μm o menos y un tamaño de bloque mínimo de
martensita es de 0,5 μm o más.

25 2. La pieza forjada de acero de grandes dimensiones de alta resistencia de acuerdo con la reivindicación 1, donde
una fracción de estructura martensítica $f_m(x)$ (%) en la que una relación de una profundidad con respecto a una
distancia desde una superficie hasta un centro se define como x ($0 \leq x \leq 1$) es

30 $f_m(x) = 100$, en la que $0 \leq x \leq 0,1$;
 $104 - 40x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,1 < x \leq 0,15$;
 $122 - 160x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,15 < x \leq 0,2$;
 $230 - 700x \leq f_m(x) \leq 100$, en la que $0,2 < x \leq 0,3$;
 $110 - 300x \leq f_m(x) \leq 112 - 40x$, en la que $0,3 < x \leq 0,35$; $(22 - 20x) / 3 \leq f_m(x) \leq 105 - 20x$, en la que $0,35 < x \leq 0,5$;
 $(32 - 40x) / 3 \leq f_m(x) \leq 95$, en la que $0,5 < x \leq 0,8$; y
35 $0 \leq f_m(x) \leq 95$, en la que $0,8 < x \leq 1$.

FIG. 1

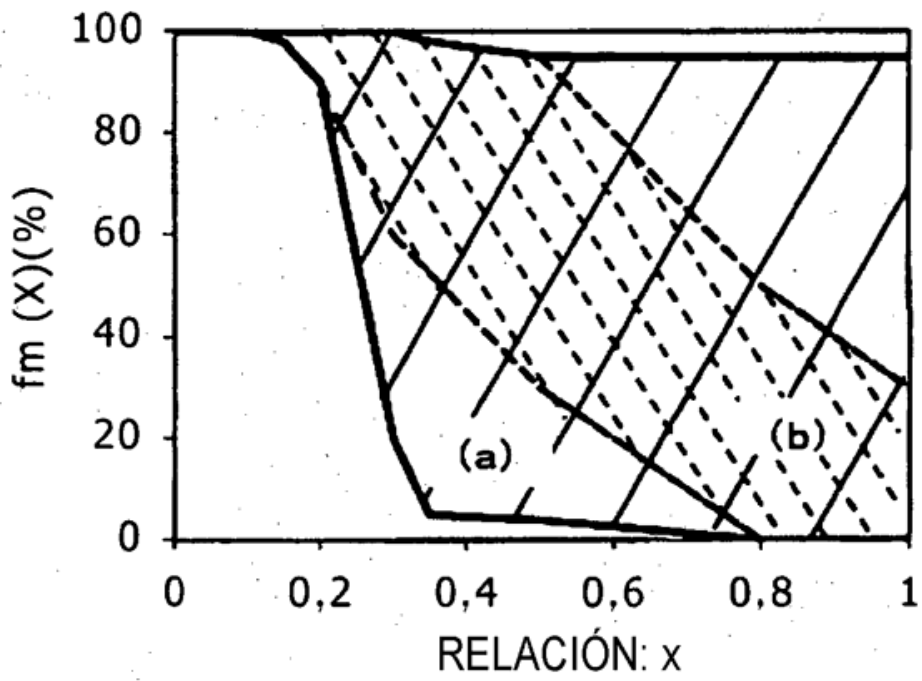


FIG. 2

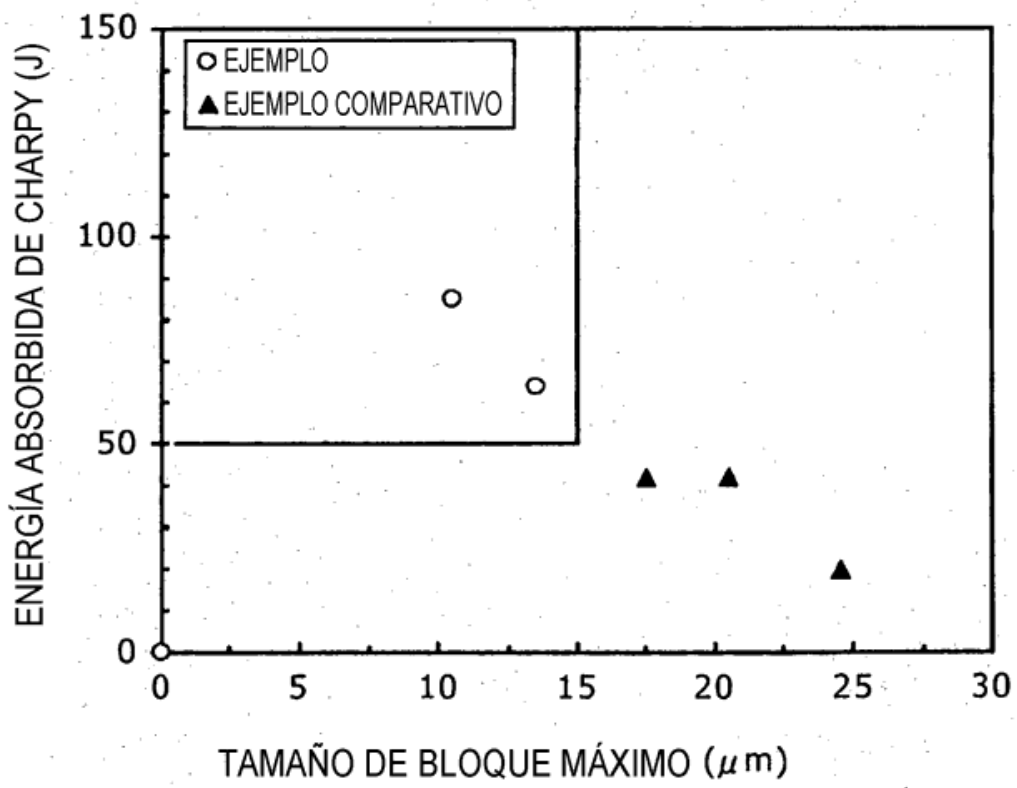


FIG. 3

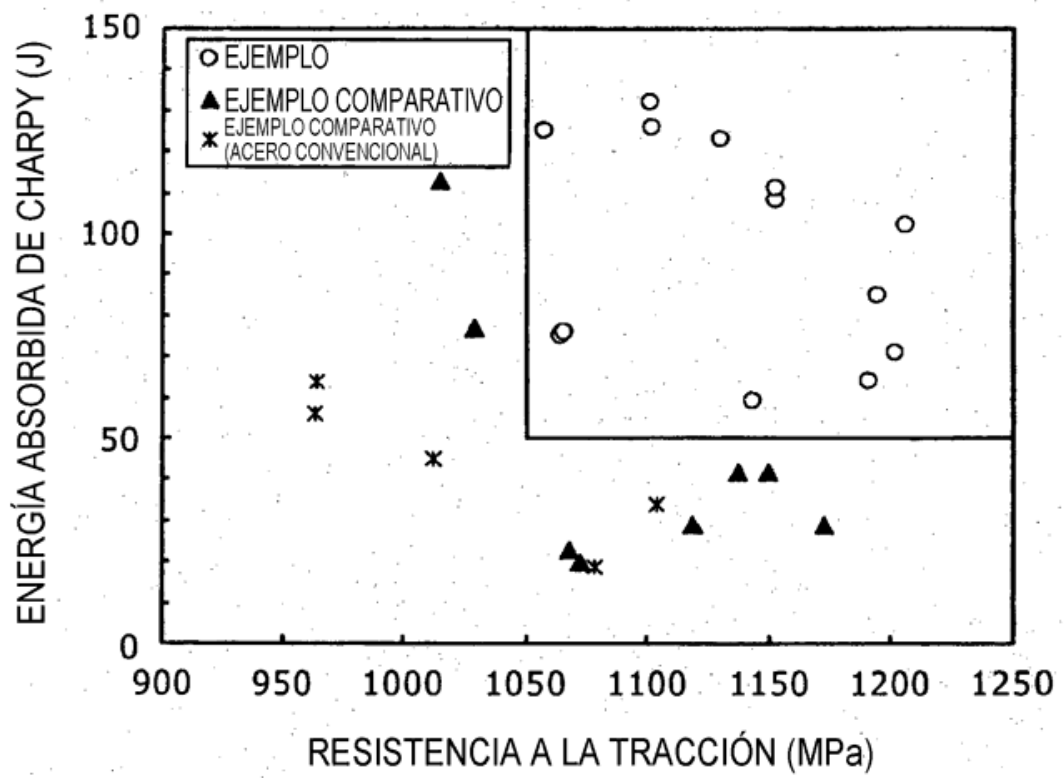


FIG. 4

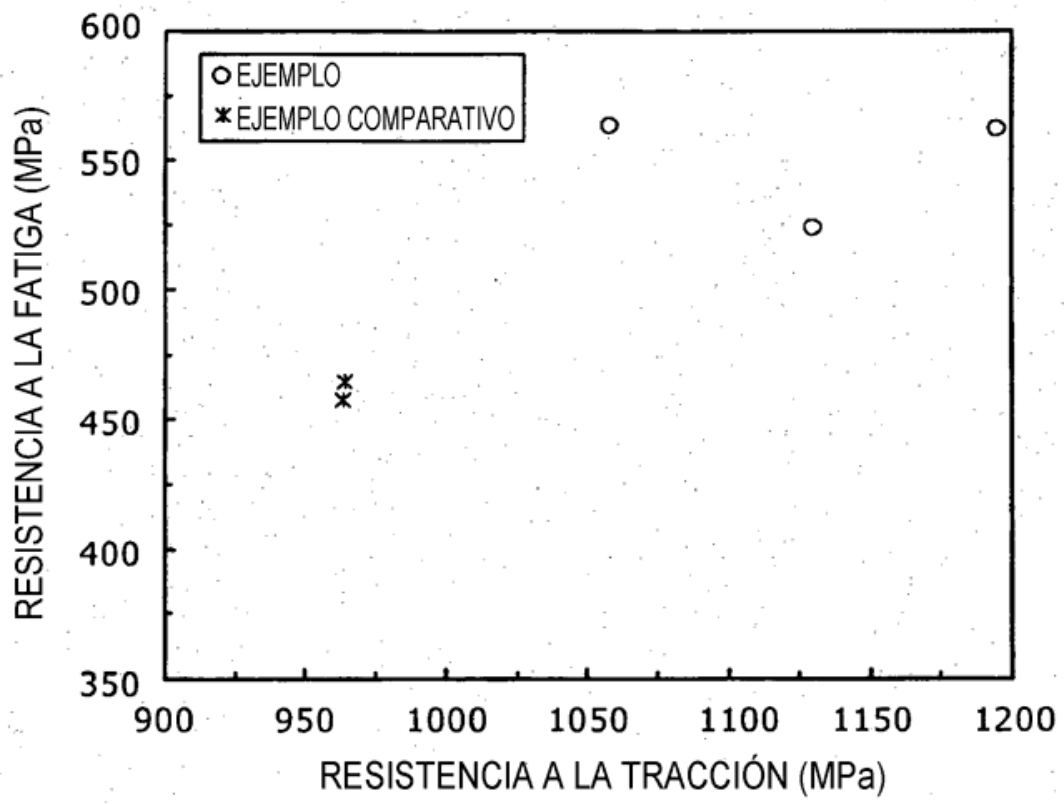
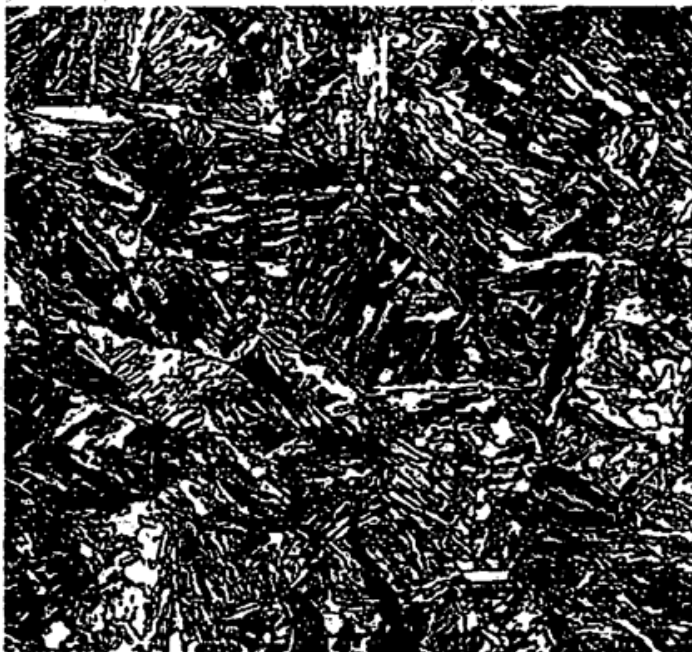
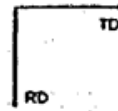


FIG. 5



20 μm



Tipo de Mapa de Escala de Grises: <ninguno>

Tipo de Mapa Codificado por Colores: Figura de Polos Inversa [001]

Hierro (Alfa)



Limites: Ángulo de Rotación

	Min	Máx	Fracción	Número	Longitud
—	15°	180°	0.766	146062	2.53 cm

* Para la estadística - cualquier par de puntos con una malorientación que supere 0° se considera un límite
 número total = 548718; longitud total = 9.50 cm

FIG. 6



Hierro (Alfa)

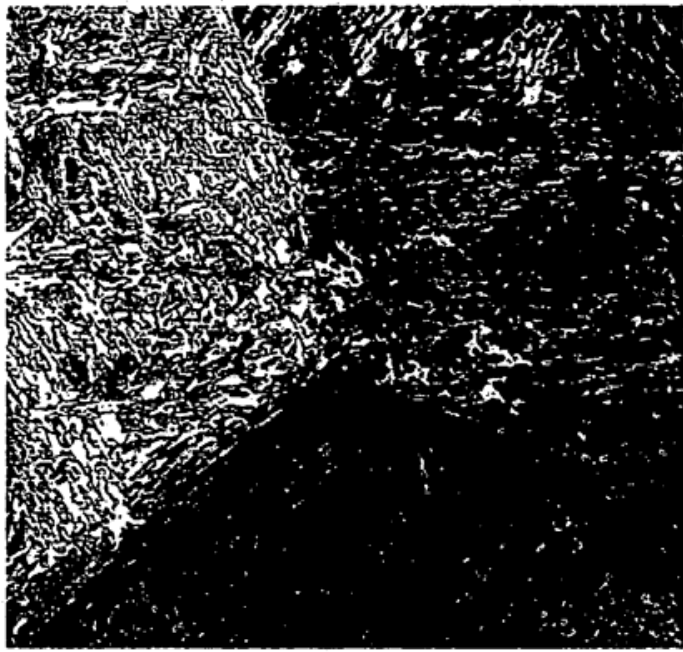


Límites: Ángulo de Rotación

	Min	Máx	Fracción	Número	Longitud
—	15°	180°	0.267	147348	2.55 cm

* Para la estadística - cualquier par de puntos con una malorientación que supere 0° se considera un límite
 número total = 551038; longitud total = 9,54 cm

FIG. 7



Hierro (Alfa)



Límites		Ángulo de Rotación		
Min	Máx	Fracción	Número	Longitud
15°	180°	0,272	149997	260 cm

* Para la estadística - cualquier par de puntos con una malorientación que supere 0° se considera un límite número total = 551528; longitud total = 9,55 cm

FIG. 8



Hierro (Alfa)

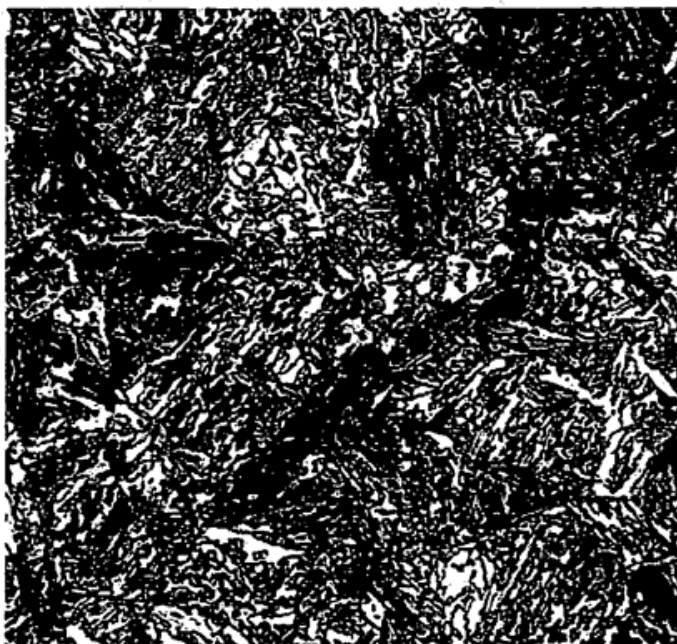


Límites: Angulo de Rotación

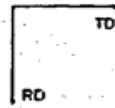
	Min	Máx	Fracción	Número	Longitud
—	15°	180°	0.298	163023	2.82 cm

* Para la estadística - cualquier par de puntos con una malorientación que supere 0° se considera un límite
 número total = 550849; longitud total = 9.54 cm

FIG. 9



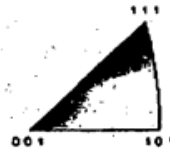
20 μm



Tipo de Mapa de Escala de Grises: <ninguno>

Tipo de Mapa Codificado por Colores: Figura de Polos Inversa [001]

Hierro (Alfa)



Limites: Angulo de Rotación

	Min	Máx	Fracción	Número	Longitud
—	15°	160°	1.000	134464	2.33 cm

* Para la estadística - cualquier par de puntos con una malorientación que supere 0° se considera un límite número total = 134474; longitud total = 2,33 cm

FIG.10

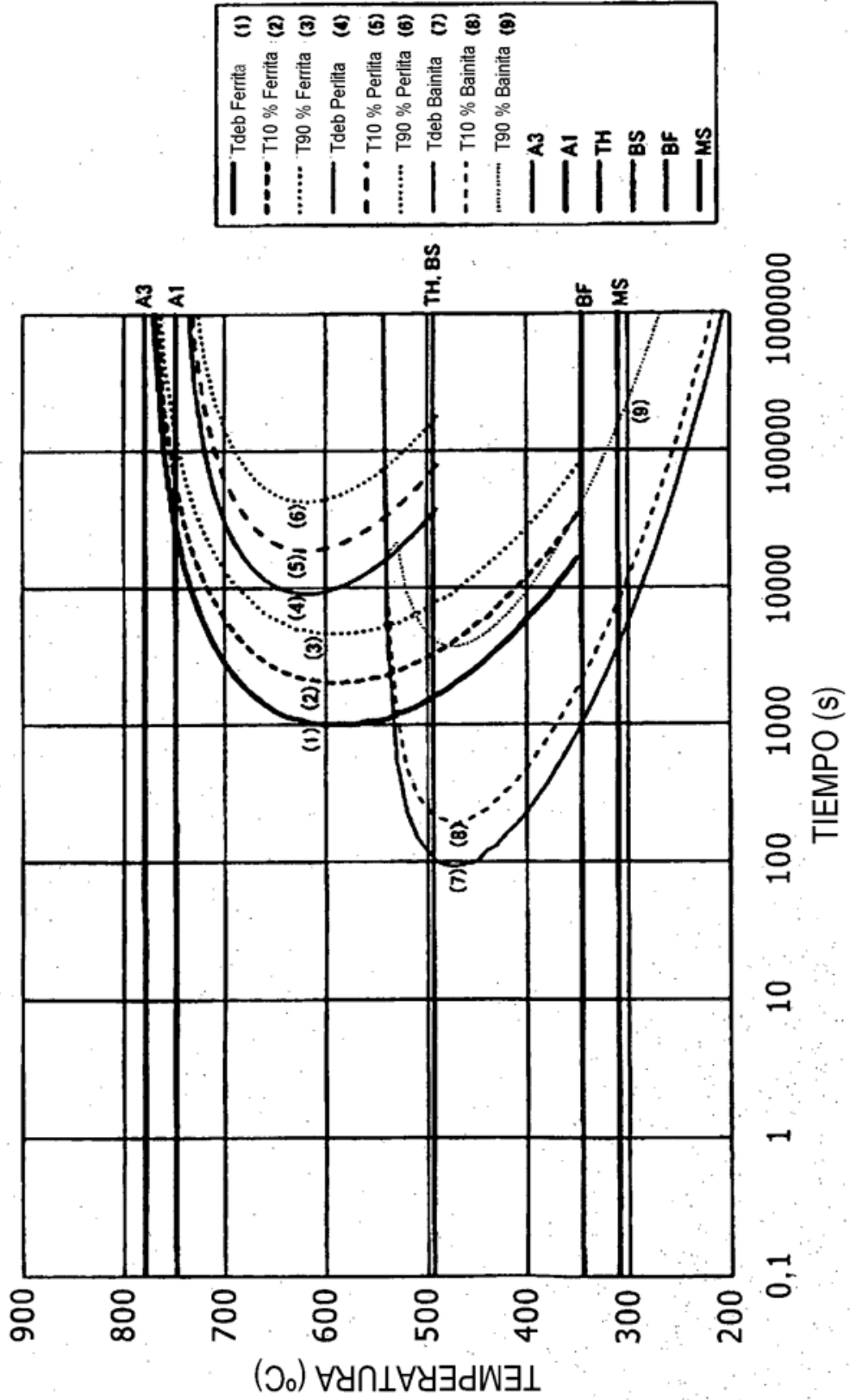


FIG. 11

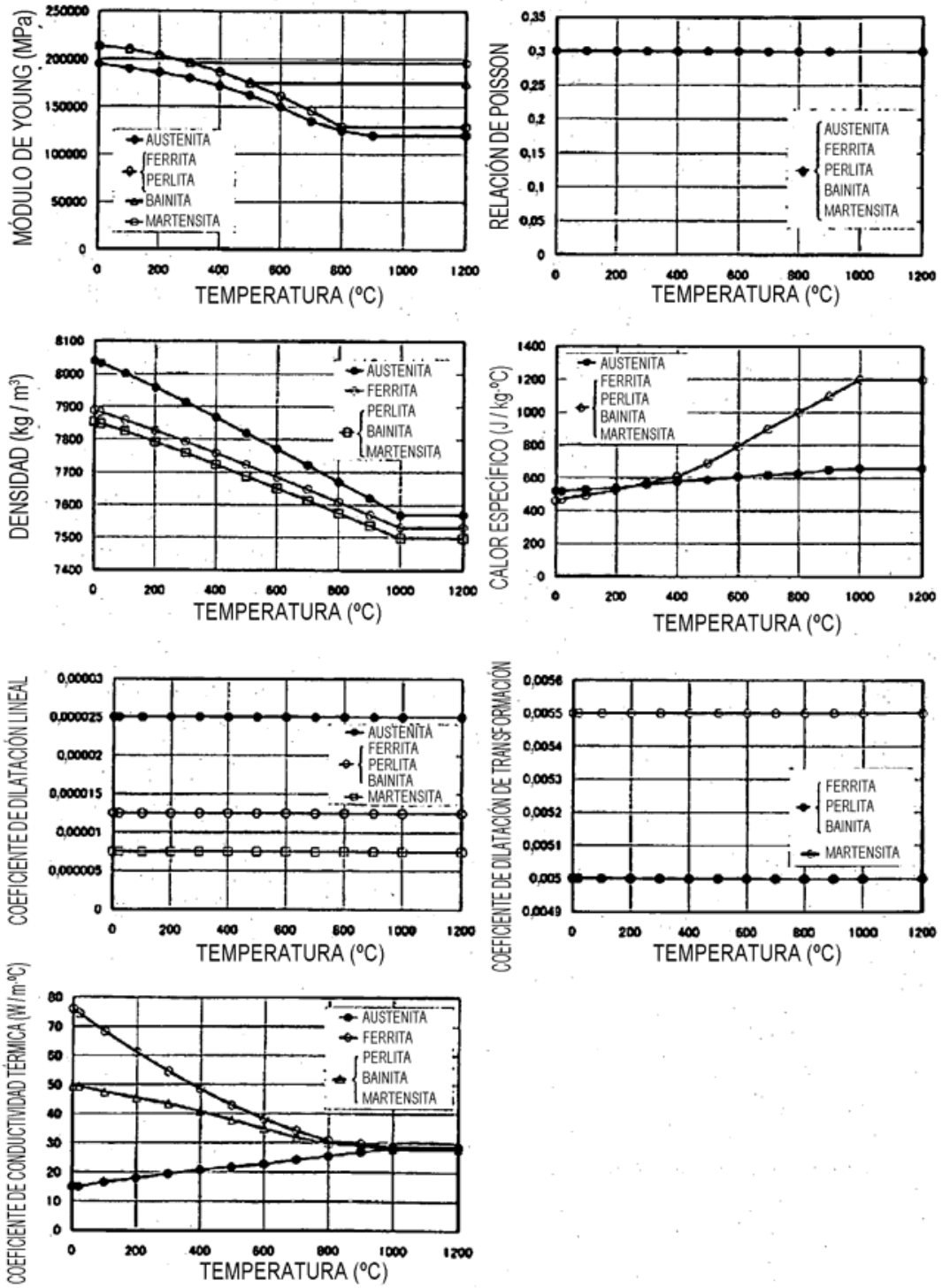


FIG.12

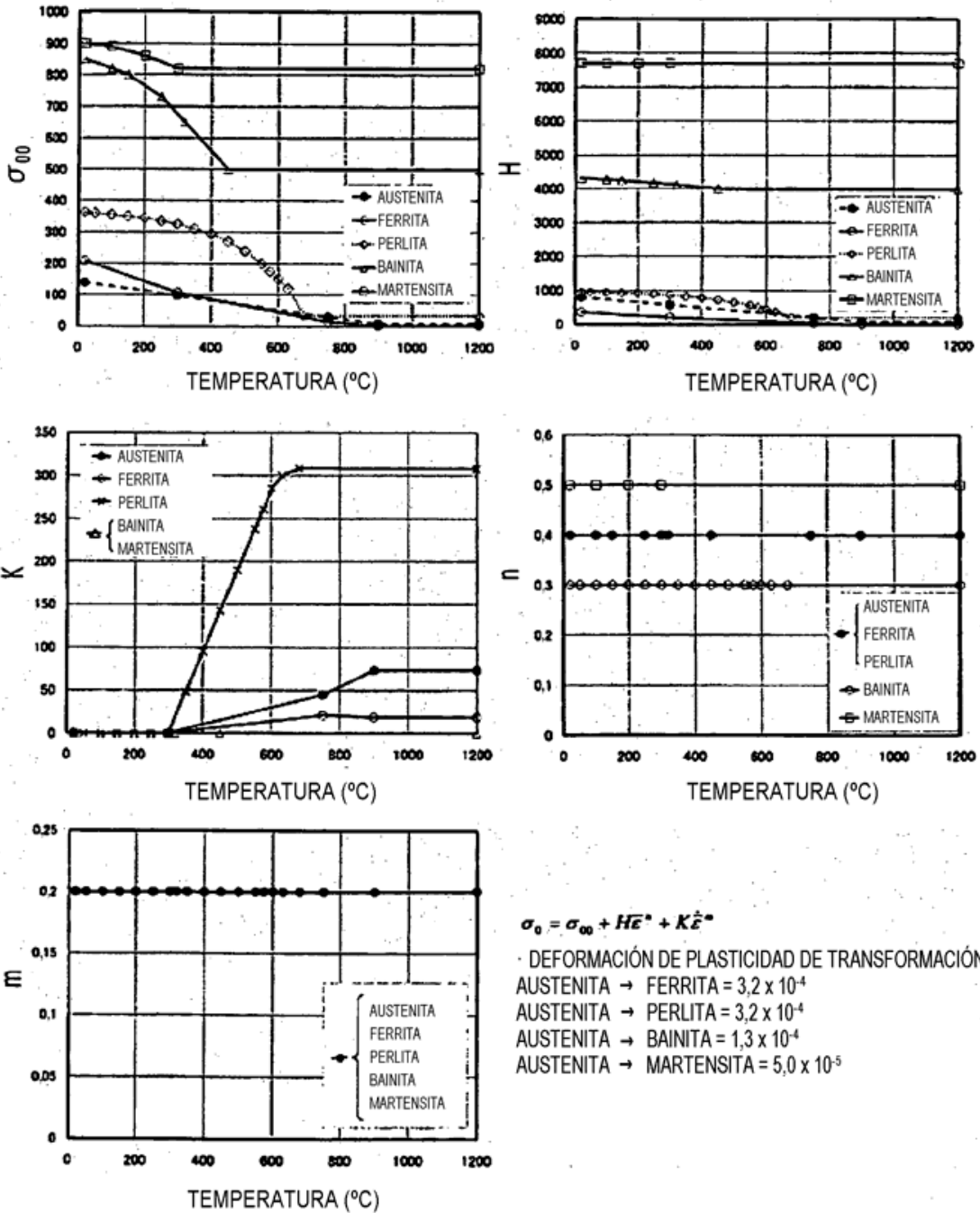


FIG. 13A

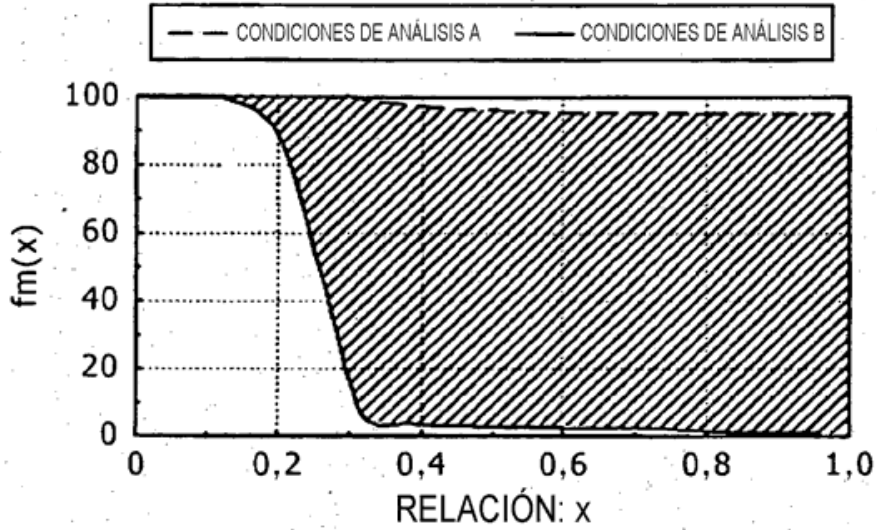


FIG. 13B

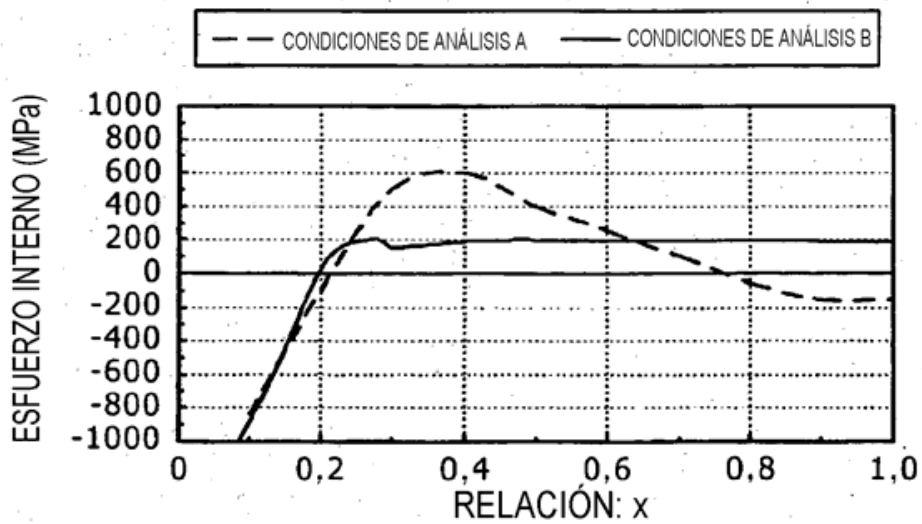


FIG. 14A

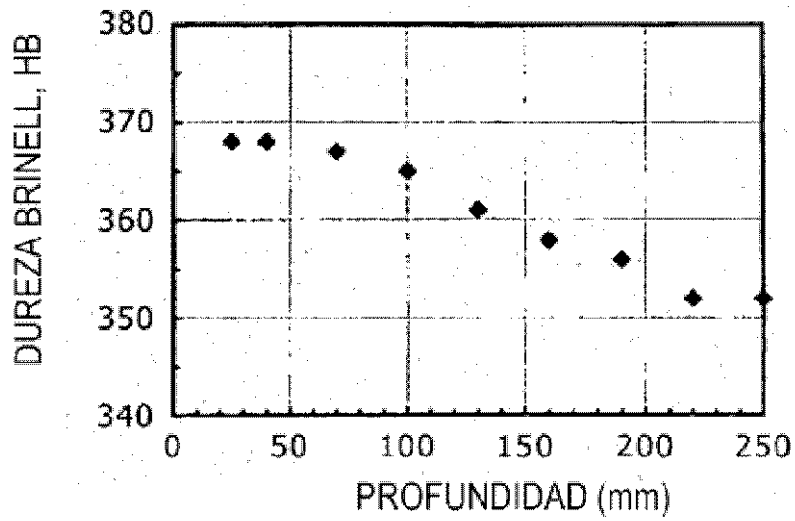


FIG. 14B

