(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 744 712**

(51) Int. Cl.:

C22C 38/00	(2006.01)	***B60B 17/00***	(2006.01)
C22C 38/22	(2006.01)		
C22C 38/02	(2006.01)		
C22C 38/04	(2006.01)		
C22C 38/06	(2006.01)		
C22C 38/24	(2006.01)		
C22C 38/42	(2006.01)		
C22C 38/46	(2006.01)		
C22C 38/44	(2006.01)		
C21D 9/34	(2006.01)		

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.04.2013** **PCT/JP2013/060588**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **31.10.2013** **WO13161548**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.04.2013** **E 13781045 (3)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.07.2019** **EP 2843071**

(54) Título: **Acero para rueda ferroviaria**

(30) Prioridad:

27.04.2012 JP 2012102821

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.02.2020

(73) Titular/es:

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

(72) Inventor/es:

YAMAMOTO, YUICHIRO;
TAKESHITA, YUKITERU;
KIRIYAMA, KENTARO y
KATO, TAKANORI

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 744 712 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Acero para rueda ferroviaria

Campo técnico

La presente invención se refiere a un acero para rueda ferroviaria y, más particularmente, a un acero para ruedas de alta dureza para ferrocarril con excelente resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga de contacto por rodadura y resistencia a la fisura térmica.

La fisura térmica es el fenómeno en el cual la banda de rodadura de una rueda que se calienta y se enfría rápidamente por un frenado de emergencia o similar se transforma en martensita quebradiza, que se denomina capa blanca, una propagación de grietas con la capa blanca como origen y ocurre una fractura quebradiza que provoca desprendimiento. La fisura térmica en ocasiones se llama "agrietamiento térmico".

Técnica anterior

En los últimos años, con un aumento en las distancias de desplazamiento y un aumento en las capacidades de carga a escala global, hay necesidad de ruedas ferroviarias (en lo sucesivo en la presente memoria), denominadas también "ruedas") que tengan una vida más duradera que las ruedas convencionales.

Los factores de daño sobre la banda de rodadura de las ruedas principalmente incluyen tres fenómenos que son (i) desgaste, (ii) fatiga de contacto por rodadura y (iii) fisura térmica, y especialmente en los últimos años, ha aumentado el número de ruedas que quedan dañadas por el desgaste asociado con el aumento en las distancias de desplazamiento y la fatiga de contacto por rodadura asociada con el aumento en las capacidades de carga. La fatiga de contacto por rodadura en ocasiones se denomina "descascarillado". Aunque una grieta que está causada por fisura térmica en ocasiones se denomina "descascarillado", la aparición de la grieta debido a la formación de una capa blanca se define en la presente memoria como "fisura térmica".

La fatiga de contacto por rodadura a alta temperatura (Descascarillado mecánico térmico, en lo sucesivo en la presente memoria denominado "TMS"), que ocurre con el aumento en la temperatura de la rueda durante el frenado, se dice actualmente que es la causa del daño de la rueda. Por este motivo, se requieren ruedas que aseguran resistencia a alta temperatura. Por ejemplo, en la norma Clase D de la AAR (Asociación Americana de Ferrocarriles), el límite elástico a 538ºC (1000ºF) se define que es de 345 MPa o mayor.

Recientemente, para suprimir la aparición de grietas en la banda de rodadura de una rueda, se requiere asegurar una ductilidad mínima y diferentes países tienen diferentes definiciones. Por ejemplo, en la norma rusa GOST10791 Grado 3, el alargamiento se define como del 8% o mayor, en la definición china TB/T 2708 CL60, el alargamiento se define como del 10% o mayor, en la norma europea EN 13262 ER9, el alargamiento se define como del 12% o mayor, en la definición de Clase D de la AAR, el alargamiento se define como del 14% o mayor y similares.

Se sabe empíricamente que la resistencia al desgaste y la fatiga de contacto por rodadura son propiedades contrarias a la resistencia a la fisura térmica. Se requiere urgentemente desarrollar el acero para rueda que tenga un excelente equilibrio de resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga de contacto por rodadura y resistencia a la fisura térmica, que incluye además tanto una alta resistencia a altas temperaturas como alta ductilidad y que puede dar una larga vida a las ruedas.

Por ejemplo, la tecnología relacionada con la rueda se describe en los siguientes documentos.

El Documento de Patente 1 describe un "acero de alta tenacidad para rueda ferroviaria" añadiendo V.

El Documento de Patente 2 describe una "llanta o rueda monobloque para un conjunto de rueda de vehículo ferroviario" que tiene una excelente resistencia al desgaste, resistencia a la fractura y resistencia al agrietamiento térmico.

El Documento de Patente 3 describe una "rueda ferroviaria" que hace compatibles a la resistencia al descascarillado y la resistencia plana (fisura térmica) como resistencia al agrietamiento térmico, disminuyendo el contenido de C, y haciendo que la parte de banda de rodadura tenga una microestructura bainítica, una microestructura martensítica revenida o una microestructura mixta de bainita y martensita revenida.

El Documento de Patente 4 describe una "rueda ferroviaria de alto carbono con excelente resistencia al desgaste y resistencia al agrietamiento térmico" en la que el contenido de C se aumenta de 0,85 a 1,20%.

El Documento de Patente 5 describe una "rueda ferroviaria con excelente resistencia al desgaste y resistencia al agrietamiento térmico" que es una rueda ferroviaria de tipo monobloque formada de acero que tiene una composición química que consiste en C: de 0,4 a 0,75%, Si: de 0,4 a 0,95%, Mn: de 0,6 a 1,2%, Cr: de 0 a menos de 0,2%, P: 0,03% o menos y S: 0,03% o menos, consistiendo el resto en Fe e impurezas, en donde la región hasta al menos la profundidad de 50 mm desde la superficie de la banda de rodadura de la rueda consiste en una microestructura perlítica, y el método de fabricación de la misma.

El Documento de Patente 6 y el Documento de Patente 7 describen un "acero para rueda ferroviaria" con una mayor resistencia al contener de 0,01 a 0,12% y de 0,009 a 0,013% de Nb, respectivamente, y una mejor fatiga de contacto por rodadura y resistencia a la fisura térmica.

El Documento de Patente 8 describe un acero para rueda que contiene V o Nb. Según la invención, se describe que la propiedad de resistencia a la fatiga de contacto por rodadura puede asegurarse sin refinado térmico.

El Documento de Patente 9 describe un raíl de alta resistencia usando acero con granos de perlita refinados por desoxidación de Ti. Según la invención, se describe que la ductilidad y tenacidad pueden mejorarse.

El Documento de Patente 10 describe un material con una propiedad de resistencia a la fatiga de contacto por rodadura mejorada definiendo el tamaño de una agrupación de alúmina.

El Documento de Patente 11 describe el acero para rueda con alta resistencia a TMS, que tiene una mejor resistencia a alta temperatura aumentando los contenidos de Si, Cr y Mo.

El Documento de Patente 12 describe un raíl de acero que tiene una composición que contiene en peso, de >0,85 a 1,20% de C, de 0,10 a 1,00% de Si, de 0,40 a 1,50% de Mn, de 0,05 a 0,50% de Cr y de 0,01 a 0,20% de V, en el que el contenido total de Si/4+Mn/2+Cr está regulado también a de 0,5 a 1,2%, siendo el resto hierro e impurezas.

El Documento de Patente 13 describe un raíl resistente al desgaste que tiene una estructura perlítica de alta resistencia. El acero incluye carbono, silicio, manganeso, fósforo, azufre y aluminio.

El Documento de Patente 14 describe un raíl para soldadura de baja expansión térmica, que es un raíl de acero que tiene una composición que contiene, en peso, de 0,80 a 1,20% de C, de 0,10 a 1,00% de Si, de 0,40 a 2,50% de Mn, de 0,0001 a 0,0050% de B, siendo el resto hierro e impurezas y en el que coeficiente de expansión térmica promedio a la temperatura de 20 a 100ºC es <=12,6*10-6/grados.

Lista de citas

Documentos de Patente

[Documento de Patente 1] JP50-104717A

[Documento de Patente 2] JP2001-158940A

[Documento de Patente 3] JP2005-350769A

[Documento de Patente 4] JP2004-315928A

[Documento de Patente 5] JP9-202937A

[Documento de Patente 6] US7559999B

[Documento de Patente 7] US7591909B

[Documento de Patente 8] JP57-143469A

[Documento de Patente 9] JP6-279927A

[Documento de Patente 10] JP6-279918A

[Documento de Patente 11] US6783610B

[Documento de Patente 12] JPH11-92867A

[Documento de Patente 13] SU1831506A3

[Documento de Patente 14] JP2000-226634A

Divulgación de la invención

Problemas que debe resolver la invención

El acero descrito en el Documento de Patente 1 tiene una baja resistencia al desgaste, porque el contenido de C es tan bajo como de 0,50 a 0,60%. Por consiguiente, el acero no puede tener un rendimiento suficiente para el aumento en la capacidad de carga de los últimos años.

El acero descrito en el Documento de Patente 2 tiene una baja resistencia al desgaste, porque el contenido de C es tan bajo como de 0,45 a 0,55%. Por consiguiente, el acero tampoco puede tener un rendimiento suficiente para el aumento en la capacidad de carga de los últimos años.

La rueda descrita en el Documento de Patente 3 tiene la parte de banda de rodadura que consiste en una microestructura bainítica, una microestructura martensítica revenida o una microestructura mixta de bainita y martensita revenida. Por lo tanto, aunque la rueda tiene una alta resistencia, la rueda tiene menor resistencia al desgaste, en comparación con el caso de una parte de banda de rodadura que consiste en una microestructura perlítica, y es difícil obtener una resistencia al desgaste igual a o mayor que la de un acero para rueda de vagoneta convencional. En concreto, en comparación con una microestructura perlítica que tiene una excelente propiedad de endurecimiento y que muestra un comportamiento con las lamelas de la misma redisponiéndose en paralelo a la superficie con el progreso del desgaste, la cantidad de desgaste se hace grande en una microestructura bainítica y una microestructura martensítica revenida (por ejemplo, hágase referencia a Sadahiro Yamamoto: "Technology for the Improvement of Wear Resistance in Steels by Microstructure Control-Microstructure Control Technology in Wear Resistant Steels with Weldability", the 161th and 162th Nishiyama memorial Seminar, Heisei 8 (1996), editada por Iron and Steel Institute of Japan, pág. 221).

El acero de la rueda descrito en el Documento de Patente 4 es difícil de aplicar a las ruedas que se producen por el tratamiento peculiar a las ruedas y denominado "método de templado de banda de rodadura". Como un ejemplo de la rueda, en la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático de una "rueda monobloque". En el caso de una rueda, el tratamiento térmico de enfriamiento de la parte de la llanta se aplica desde la circunferencia exterior de la rueda para dar una tensión residual de compresión a la parte de llanta después de que se calienta toda la rueda. En el tratamiento de enfriamiento, la región cerca de la parte de llanta se enfría rápidamente, pero la velocidad de enfriamiento de la parte de cubo es baja. Por lo tanto, cuando el acero de la rueda descrita en el documento se trata térmicamente mediante un método de templado de banda de rodadura, hay posibilidad de precipitación de cementita hiper-eutectoide en el límite de grano de la austenita de la parte de cubo. La cementita hiper-eutectoide tiene el mismo efecto que las inclusiones gruesas, y reduce extremadamente la tenacidad y la vida a fatiga (por ejemplo, hágase referencia a Yukitaka Murakami: Influence of micro defects and inclusions (2004), pág. 182 "Yokendo").

La rueda descrita en el Documento de Patente 5 tiene una dureza insuficiente en algunos casos. Por consiguiente, la rueda no siempre puede tener un rendimiento suficiente para el aumento en la capacidad de carga de los últimos años.

El acero para rueda ferroviaria descrito en el Documento de Patente 6 contiene tanto Mo como de 0,20 a 0,30% de Mo. Por lo tanto, se forma fácilmente la microestructura con baja resistencia al desgaste tal como una microestructura bainítica o una microestructura perlítica degenerada y apenas se obtiene una resistencia al desgaste favorable. Además, el acero siempre contiene de 0,01 a 0,12% de Nb. En ocasiones se forman inclusiones gruesas en el acero que contiene Nb, y esto reduce extremadamente la tenacidad y la vida a fatiga similarmente a la cementita hiper-eutectoide mencionada anteriormente.

El acero para rueda ferroviaria descrito en el Documento de Patente 7 siempre contiene también de 0,009 a 0,013% de Nb. Como se ha descrito anteriormente, en ocasiones se forman inclusiones gruesas en el acero que contiene Nb, y eso reduce extremadamente la tenacidad y la vida a fatiga similarmente a la cementita hiper-eutectoide.

El acero para rueda ferroviaria descrito en el Documento de Patente 8 contiene 0,15% o más de Cr. En el acero con un alto contenido de Cr, se forma fácilmente la microestructura con una baja resistencia al desgaste tal como una microestructura bainítica si la velocidad de enfriamiento es alta. En esta invención, la formación de estas microestructuras se evita adoptando una baja velocidad de enfriamiento durante el enfriamiento con chorro de aire o similar en la región de temperatura de 700ºC a 500ºC después del forjado en caliente. Sin embargo, con un enfriamiento lento, no se obtiene una dureza suficiente, y el acero no puede tener un rendimiento suficiente para el aumento en la capacidad de carga de los últimos años. Además, cuando la velocidad de enfriamiento es alta, se forma una microestructura bainítica en la parte de llanta y disminuye la resistencia al desgaste.

En el acero descrito en el Documento de Patente 9, en ocasiones se forman inclusiones gruesas que contienen Ti, dependiendo del proceso de producción. Esto reduce extremadamente la tenacidad y la vida a fatiga similarmente a la cementita hiper-eutectoide mencionada anteriormente.

Se considera que el acero descrito en el Documento de Patente 10 tiene una dureza suficiente, y una propiedad de resistencia a la fatiga por rodadura alta, pero no se presta atención a la resistencia a la fisura térmica.

El acero para rueda descrito en el Documento de Patente 11 contiene 0,08% o más de Mo y, por lo tanto, tiene una alta resistencia a alta temperatura y una resistencia a TMS excelente, pero la ductilidad no se tiene en consideración. Además, la adición de Mo en exceso tiende a romper la microestructura lamelar de la perlita, y la resistencia al desgaste tiende a disminuir. Además, en el caso del acero que contiene Mo en exceso, es difícil asegurar una resistencia al desgaste porque es fácil que se forme una microestructura bainítica en la parte de llanta, si la velocidad de enfriamiento es alta.

La presente invención se ha creado para resolver los problemas descritos anteriormente, y tiene como objetivo proporcionar un acero para rueda ferroviaria que tiene un excelente equilibrio de resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga de contacto por rodadura, resistencia a la fisura térmica, y que incluye además tanto un alto límite elástico a alta temperatura como una alta ductilidad, y que puede dar una larga vida a la rueda.

Medios para resolver los problemas

Como resultado, los presentes inventores estudiaron variadamente la resistencia al desgaste, la resistencia a la fatiga de contacto por rodadura, la resistencia a la fisura térmica, la resistencia y ductilidad a alta temperatura, dándose a conocer las siguientes cuestiones (a) a (e).

(a) La resistencia al desgaste mejora más cuando la microestructura del material de acero se forma como microestructura perlítica y cuando la dureza es mayor.

(b) La resistencia a la fatiga de contacto por rodadura mejora más cuando la dureza es mayor, independientemente de la microestructura.

(c) La resistencia a la fisura térmica mejora más cuando la capacidad de endurecimiento es menor.

(d) La resistencia a alta temperatura mejora más cuando los contenidos de Si y V son mayores.

(e) La ductilidad mejora más cuando el contenido de Si es mayor y el contenido de V es más pequeño.

A partir de lo anterior, los presentes inventores han llegado a la conclusión de que para resolver los problemas mencionados anteriormente, es necesario desarrollar un acero en el que se obtenga una microestructura perlítica por tratamiento térmico, la dureza sea alta y la capacidad de endurecimiento sea baja, y los contenidos de Si y V estén optimizados.

En lo sucesivo en la presente memoria, se describirá en detalle un ejemplo de los contenidos que han estudiado los presentes inventores.

En primer lugar, los presentes inventores evaluaron las influencias que tienen los respectivos elementos sobre la dureza y la capacidad de endurecimiento, mediante un ensayo de templado final de Jominy (en lo sucesivo en la presente memoria, denominado el "ensayo de Jominy") que es similar al templado de la banda de rodadura de una rueda real en las condiciones de tratamiento térmico.

Los aceros 1 a 24 que tienen las composiciones químicas mostradas en la Tabla 1 se fundieron en un horno de vacío a escala de laboratorio y se produjeron lingotes. A partir de cada uno de los lingotes, se produjo una barra redonda de 35 mm de diámetro, una barra redonda de 160 mm de diámetro y una barra redonda de 70 mm de diámetro mediante forjado en caliente. Para el acero 1, se produjo también una barra redonda de 220 mm para producir "una muestra de ensayo para raíl" para un ensayo de fatiga de contacto por rodadura que se describirá posteriormente.

Obsérvese que el acero 1 en la Tabla 1 corresponde al acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" en la norma M-107/M-207 de la AAR (Asociación Americana de Ferrocarriles).

Tabla 1

Acero N.º	Composición química (% en masa, siendo el resto Fe e impurezas)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
1	0,69	0,29	0,82	0,013	0,007	0,01	0,02	0,08	0,01	0,01	0,056
2	0,69	0,80	0,76	0,011	0,007	-	0,03	0,10	0,01	0,01	0,050
3	0,70	0,82	0,82	0,004	0,008	-	0,04	0,09	0,01	0,10	0,034
4	0,77	0,83	0,82	0,004	0,007	-	0,04	0,09	0,01	0,09	0,036
5	0,86	0,85	0,83	0,004	0,008	-	0,04	0,10	0,01	0,01	0,037
6	0,88	0,50	0,61	0,004	0,008	-	0,04	0,25	0,01	0,01	0,034
7	0,74	0,80	0,39	0,004	0,008	-	0,04	0,45	0,01	0,09	0,033
8	0,71	0,79	0,77	0,014	0,007	0,01	0,02	0,10	0,01	0,09	0,036
9	0,80	0,78	0,76	0,014	0,006	0,01	0,02	0,10	0,01	0,09	0,039
10	0,63	0,79	0,79	0,014	0,009	0,01	0,02	0,10	0,01	0,09	0,037
11	0,72	0,23	0,18	0,003	0,001	0,01	0,01	-	0,01	-	0,031
12	0,72	0,25	0,77	0,003	0,001	0,01	0,01	0,19	0,01	-	0,021
13	0,76	0,25	0,78	0,003	0,001	0,01	0,01	-	0,09	-	0,031
14	0,75	0,25	0,79	0,004	0,001	0,01	0,01	-	0,20	-	0,035
15	0,74	0,23	0,74	0,003	0,001	0,01	0,01	-	0,01	0,09	0,026

Acero N.º	Composición química (% en masa, siendo el resto Fe e impurezas)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
16	0,74	0,79	0,80	0,004	0,001	0,01	0,01	-	0,01	0,05	0,034
17	0,75	0,86	0,79	0,004	0,001	0,01	0,01	0,15	0,15	-	0,041
18	0,75	0,81	0,82	0,003	0,001	0,01	0,02	0,42	0,07	0,07	0,023
19	0,74	0,65	0,82	0,004	0,001	0,01	0,02	0,54	0,11	-	0,032
20	0,74	1,10	0,82	0,003	0,001	0,01	0,01	-	0,01	-	0,041
21	0,74	0,23	2,10	0,004	0,001	0,01	0,01	-	0,01	-	0,038
22	0,73	0,25	0,81	0,003	0,001	0,01	0,01	-	0,01	0,21	0,028
23	0,75	0,79	0,83	0,003	0,001	0,01	0,02	0,82	0,18	-	0,026
24	0,74	0,84	0,82	0,004	0,001	0,01	0,02	0,54	0,25	0,08	0,031
25	0,74	0,84	0,79	0,015	0,007	0,01	0,01	0,09	-	0,10	0,042
26	0,76	0,84	0,79	0,015	0,006	0,01	0,01	0,09	-	0,05	0,040
27	0,76	0,83	0,80	0,016	0,006	0,01	0,01	0,09	-	0,02	0,038
28	0,77	0,24	0,64	0,015	0,007	0,01	0,01	0,19	-	0,10	0,038
29	0,78	0,24	0,65	0,015	0,007	0,01	0,01	0,19	-	0,08	0,037
30	0,78	0,23	0,64	0,014	0,007	0,01	0,01	0,19	-	0,05	0,035
31	0,74	0,46	0,65	0,012	0,006	0,01	0,01	0,11	-	0,09	0,037
32	0,74	0,43	0,67	0,011	0,007	0,01	0,01	0,10	-	0,05	0,037
33	0,76	0,44	0,67	0,011	0,007	0,01	0,01	0,10	-	0,03	0,035
34	0,74	0,67	0,79	0,012	0,007	0,01	0,01	0,10	0,03	0,04	0,036
35	0,75	0,68	0,78	0,013	0,007	0,01	0,01	0,11	0,04	0,05	0,041
36	0,76	0,68	0,78	0,012	0,007	0,01	0,01	0,10	0,06	0,09	0,035

A partir de la barra redonda de 35 mm de diámetro, se tomó una muestra de ensayo de Jominy, después de la austenización a 900ºC durante 30 minutos en atmósfera de aire, se realizó el templado final, se realizó a continuación el corte paralelo a 1,0 mm, y se realizó la medición de la dureza Rockwell C (en lo sucesivo en la presente memoria, también denominada "HRC").

Se midió la HRC en la posición a 40 mm desde el extremo enfriado con agua (en lo sucesivo en la presente memoria, denominado "dureza a 40 mm"), y se evaluó la influencia que tiene cada uno de los elementos sobre el valor. Como resultado, se ha encontrado que la "dureza a 40 mm" tiene una relación lineal con Fn1, expresado por la siguiente fórmula (1) como sigue, como se muestra en la Figura 2. Además, se ha encontrado que cuando Fn1 supera 43, como en el caso del acero 23 y el acero 24, se forman microestructuras bainíticas al menos en parte, y no se establece la relación lineal.

Obsérvese que se midió la HRC en la posición a 40 mm desde el extremo enfriado con agua porque una rueda se mecaniza directamente bajo la banda de rodadura después del tratamiento térmico y, en ocasiones, se usa mecanizado repetido después del inicio del uso y la propiedad del acero en el interior con menor dureza que la superficie influye significativamente en la vida de la rueda.

En la Figura 2, el acero 1 que corresponde al acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" de la AAR se muestra mediante la marca "▲". Obsérvese que la microestructura en la posición a 40 mm a partir del extremo enfriado con agua tenía un pulido especular, posteriormente, se atacó con nital, se observó al microscopio óptico y se evaluó.

$$Fn1 = 2{,}7 + 29{,}5 \times C + 2{,}9 \times Si + 6{,}9 \times Mn + 10{,}8 \times Cr + 30{,}3 \times Mo + 44{,}3 \times V \cdots (1)$$

C, Si, Mn, Cr, Mo y V en la fórmula (1) significan los contenidos en % en masa de los elementos.

En la Tabla 2, se organizan y muestran los valores de medición de la "dureza a 40 mm" descritos anteriormente y Fn1 expresado mediante la fórmula (1).

La capacidad de endurecimiento se evaluó midiendo la distancia desde el extremo enfriado con agua, en unidades de milímetros, donde la fracción de microestructura martensítica es del 50% (en lo sucesivo en la presente memoria, denominada "M50%") a partir de la dureza de Jominy, basado en la dureza del caso en el que la fracción de microestructura martentísica sea del 50% descrito en la norma ASTM A255. Como resultado, se ha encontrado que

"M50%" tiene una correlación con Fn2 expresado por la siguiente fórmula (2) como sigue, como se muestra en la Figura 3. Obsérvese que en la Figura 3, el acero 1 se muestra mediante la marca "▲".

Fn2 = exp(0,76) x exp(0,05 x C) x exp(1,35 x Si) x exp(0,38 x Mn) x exp(0,77 x Cr) x exp(3,0 x Mo) x exp(4,6 x V) ··· (2)

C, Si, Mn, Cr, Mo y V en la fórmula (2) significan también los contenidos en % en masa de los elementos. Los términos "exp(0,05 x C)" y similares significan la representación exponencial de "$e^{0,05 \times C}$" y similares. Obsérvese que "e" es "la constante de Napier" que es una de las constantes matemáticas, y que se usa como base del logaritmo natural.

En la Tabla 2 se organizan y muestran los valores de medición de M50% descritos anteriormente y Fn2 expresado mediante la fórmula (2).

Tabla 2

Acero N.º	Dureza a 40 mm (HRC)	Fn1	M50% (mm)	Fn2	Vida de contacto de fatiga por rodadura (ciclo)	Cantidad de desgaste (g)
1	31,1	31,2	5,6	5,1	1.830.898	0,320
2	32,3	32,4	8,3	10,1	2.191.425	0,312
3	36,6	37,1	13,6	16,0	3.283.349	0,268
4	39,3	38,7	16,5	15,5	4.453.779	0,242
5	38,6	38,1	10,6	11,2	4.114.188	0,241
6	37,3	37,8	6,3	7,2	3.675.793	0,249
7	38,9	38,7	14,2	16,7	4.342.381	0,225
8	37,8	36,6	16,2	14,5	3.688.978	0,247
9	39,6	39,2	15,7	14,3	4.480.886	0,241
10	35,0	34,4	15,5	14,6	2.867.978	0,279
11	25,4	26,2	3,8	3,3	814.399	0,384
12	32,6	32,3	4,6	5,0	2.138.325	0,312
13	34,1	34,0	4,5	5,5	2.583.220	0,286
14	37,2	37,1	6,8	7,7	3.602.246	0,253
15	35,8	34,6	5,4	6,3	3.089.949	0,263
16	34,8	34,9	9,2	11,3	2.785.571	0,279
17	38,9	38,9	15,0	16,8	4.258.560	0,242
18	42,1	42,6	21,8	21,3	5.621.775	0,201
19	41,0	41,2	16,5	15,4	5.092.738	0,223
20	32,4	33,7	14,9	13,8	2.085.608	0,327
21	39,7	40,0	7,1	6,9	4.587.370	0,227
22	38,7	40,2	11,2	11,4	4.266.610	0,235
23	42,5	47,2	29,7	28,5	5.892.201	0,314
24	42,6	49,6	46,9	43,7	5.675.736	0,312

Fn1=2,7+29,5xC+2,9xSi+6,9xMn+10,8xCr+30,3xMo+44,3xV

Fn2=exp(0,76)xexp(0,05xC)xexp(1,35xSi)xexp(0,38xMn)xexp(0,77xCr)xexp(3,0xMo)xexp(4,6xV)

A continuación, los presentes inventores investigaron la relación de la resistencia a la fatiga de contacto por rodadura y la resistencia al desgaste, y Fn1 expresado mediante la fórmula (1) usando los aceros 1 a 24 mostrados en la Tabla 1.

En concreto, se produjo para cada uno de los aceros la muestra de ensayo que era la barra redonda de 160 mm de diámetro que se cortó a una longitud de 100 mm, posteriormente, se calentó a una temperatura de 900ºC durante 30 minutos y se templó en aceite.

Para los aceros 1 a 24, las muestras de ensayo en las configuraciones mostradas en la Figura 4(a) se tomaron en primer lugar como "muestras de ensayo de rueda" para su uso en un ensayo de fatiga de contacto por rodadura, a partir de las regiones en los centros de las muestras de ensayo producidas como se ha descrito anteriormente.

Para el acero 1, se produjo la muestra de ensayo que es la barra redonda de 220 mm de diámetro que se cortó a una longitud de 100 mm, posteriormente, se calentó a 900ºC durante 30 minutos y, posteriormente, se templó en aceite y, a partir de la parte central de la muestra de ensayo, la muestra de ensayo en la configuración mostrada en la Figura 4(b) se tomó como "muestra de ensayo de raíl" para su uso en un ensayo de fatiga de contacto por rodadura.

Similarmente, para los aceros 1 a 24, v se produjeron las muestras de ensayo que eran las barras redondas de 70 mm de diámetro que se cortaron a longitudes de 100 mm, posteriormente, se calentaron a 900ºC durante 30 minutos y, posteriormente, se templaron en aceite. A partir de las regiones en los centros de las muestras de ensayo, las muestras de ensayo en la configuración mostrada en la Figura 5(a) se tomaron como "muestras de ensayo de rueda" para su uso en el ensayo de desgaste.

Para el acero 1, se produjo la muestra de ensayo de barra redonda de 100 mm de longitud y 70 mm de diámetro para la que se llevó a cabo el tratamiento térmico similar a las muestras de ensayo de rueda descritas anteriormente, y a partir de la región en el centro de la misma, la muestra de ensayo en la configuración mostrada en la Figura 5(b) se tomó también como "muestra de ensayo de raíl" para su uso en el ensayo de desgaste.

En primer lugar, se llevó a cabo un ensayo de fatiga de contacto por rodadura mediante el método mostrado esquemáticamente en la Figura 6 con el uso de las muestras de ensayo de rueda mostradas en la Figura 4(a) de los aceros 1 a 24, y la muestra de ensayo de raíl mostrada en la Figura 4(b) del acero 1.

Las condiciones del ensayo de fatiga de contacto por rodadura eran la tensión hertziana: 1100 MPa, la razón de deslizamiento: 0,28%, las revoluciones: 1000 rpm en el lado de la rueda, y 602 rpm en el lado del raíl, y el ensayo se llevó a cabo bajo lubricación con agua. El ensayo se llevó a cabo mientras la aceleración se supervisaba con un acelerómetro de vibración y el número de ciclos en el que se detectó 0,5 G se evaluó como la vida a fatiga de contacto por rodadura. Obsérvese que se ajustó 0,5 G como la referencia, debido al resultado de evaluación de la relación de la aceleración de detección y el estado de daño en el ensayo preliminar previo, debía confirmarse una aparición obvia de desprendimiento sobre la superficie de contacto en el caso de que la aceleración superara los 0,5 G.

En la Tabla 2, se muestra la vida a fatiga de contacto por rodadura en combinación. Además, en la Figura 7, se muestra la relación de la vida a fatiga de contacto por rodadura y Fn1 expresado mediante la fórmula (1).

Obsérvese que "2.E + 06" en la Figura 7 y similares significa "$2,0 \times 10^{6}$" y similares. En la Figura 7, el acero 1 se muestra también mediante la marca "▲".

Como se muestra en la Figura 7, se ha encontrado que la vida a fatiga de contacto por rodadura tiene una correlación con Fn1 expresado mediante la fórmula (1), y si Fn1 es 32 o mayor, la vida a fatiga de contacto por rodadura puede ser la del acero 1 correspondiente al acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" de la AAR o mayor.

Además, el ensayo de desgaste se llevó a cabo por el método mostrado esquemáticamente en la Figura 8 con el uso de las muestras de ensayo de rueda mostradas en la Figura 5(a) de los aceros 1 a 24, y la muestra de ensayo de raíl mostrada en la Figura 5(b) del acero 1. Obsérvese que en el ensayo de desgaste, se usó la máquina de ensayo de desgaste de tipo Nishihara.

Las condiciones de ensayo específicas fueron la tensión hertziana: 2200 MPa, la razón de deslizamiento: 0,8% y las revoluciones: 776 rpm en el lado de la rueda, y 800 rpm en el lado del raíl, y el ensayo se llevó a cabo en condición seca. Después de que el ensayo se realizara hasta el número de ciclos de 5×10^{5}, la cantidad de desgaste se obtuvo a partir de la diferencia de masa de la muestra de ensayo antes y después del ensayo.

En la Tabla 2, se muestra la cantidad de desgaste en combinación. Además, en la Figura 9, se muestra la relación de la cantidad de desgaste y Fn1 expresado mediante la fórmula (1). En la Figura 9, el acero 1 se muestra mediante la marca "▲".

Se ha encontrado que, siempre y cuando la microestructura sea una microestructura perlítica, la cantidad de desgaste disminuye en proporción a Fn1 expresado mediante la fórmula (1), y si Fn1 es 32 o mayor, la cantidad de desgaste puede ser la del acero 1 o menor, como se muestra en la Figura 9.

Cuando Fn1 supera 43, se forma microestructura bainítica al menos en parte, como se ha descrito anteriormente. Puede confirmarse que cuando está contenida una microestructura bainítica, la cantidad de desgaste no disminuye ni siquiera si aumenta Fn1, y la resistencia al desgaste es inferior en comparación con el caso de la microestructura en la que predomina la perlita.

Ying JIN et al. informan en Railway Technical Research Institute Report, Vol. 19 (2005) N.º 9, pág. 17, que cuanto mayor es el espesor de la capa templada denominada capa blanca, mayor se hace la profundidad de la grieta, y es probable que ocurra la fisura térmica (significando "fisura térmica" en la presente memoria, aunque se describe como "descascarillado" en las frases).

De esta manera, los presentes inventores también estudiaron la influencia que tiene la capacidad de endurecimiento sobre la fisura térmica en detalle.

A partir del informe de Ying JIN et al., se predice que, a medida que aumenta la capacidad de endurecimiento, el espesor de la capa blanca aumenta más, aparece una grieta y la vida de aparición de fisura térmica disminuye y, por lo tanto, se investigó la relación entre la capacidad de endurecimiento y la vida de inicio de grieta en el caso de que se forme la capa blanca.

Más específicamente, se usaron las "muestras de ensayo de rueda" en la configuración mostrada en la Figura 4(a) del acero 1, acero 2, acero 5, acero 11, acero 12 y acero 14 descritos en la Tabla 1 y la "muestra de ensayo de raíl" en la configuración mostrada en la Figura 4(b) del acero 1. La capa blanca gruesa que conducía a fisura térmica se formó sobre las superficies de ensayo de las "muestras de ensayo de rueda" mediante láser YAG, después de lo cual, se llevó a cabo el ensayo de fatiga de contacto por rodadura y se investigó la vida de inicio de grieta (resistencia a la fisura térmica). Las condiciones de calentamiento con láser YAG eran la potencia de salida de láser: 2500 W, y la velocidad de alimentación: 1,2 m/min, y la capa blanca se enfrió con aire después del calentamiento con láser.

Obsérvese que las condiciones del ensayo de fatiga de contacto por rodadura eran la tensión hertziana: 1100 MPa, la razón de deslizamiento: 0,28%, las revoluciones: 100 rpm en el lado de la rueda y 60 rpm en el lado del raíl y el ensayo se llevó a cabo bajo lubricación con agua. Obsérvese que el ensayo se detuvo cada 200 ciclos hasta el número de ciclos de rodadura de 2000 veces y cada 2000 ciclos cuando el número de ciclos de rodadura superaba los 2000 ciclos, y se comprobó visualmente la presencia y ausencia de una grieta sobre las superficies de las muestras de ensayo.

Como resultado, se ha encontrado que el espesor de la capa blanca aumenta con el aumento de Fn2 expresado mediante la fórmula (2) que está correlacionado con "M50%", que es un índice de la capacidad de endurecimiento y con esto, la vida de inicio de grieta disminuye abruptamente, como se muestra en las Figuras 10 y 11.

Adicionalmente, se ha encontrado que cuando Fn2 supera 25, la vida de inicio de grieta se reduce tan extremadamente que una grieta puede ya haberse confirmado por una primera inspección visual (en concreto, la inspección visual en el número de ciclos de rodadura de 200 veces).

A partir del resultado descrito anteriormente, los presentes inventores han concluido que si la composición química del acero se ajusta de modo que Fn2 expresado mediante la fórmula (2) es 25 o menor, puede evitarse una reducción extrema en la vida de inicio de grieta, que es una vida de aparición de fisura térmica.

A continuación, los presentes inventores fundieron el acero 1, y los aceros 25 a 36 de la Tabla 1 en el horno de vacío a escala de laboratorio, produjeron lingotes, produjeron barras redondas de 70 mm de diámetro mediante forjado en caliente a partir de los lingotes respectivos, calentaron y templaron en aceite las barras redondas y tomaron las muestras de ensayo de tracción a alta temperatura de 6 mm de diámetro de GL 25 mm de acuerdo con la norma ASTM E8, y las muestras de ensayo de tracción a temperatura normal de 12,5 mm de diámetro de GL 50 mm de acuerdo con la norma ASTM E370, a partir de las partes de microestructura perlítica interna.

Con el uso de estas muestras de ensayo, se llevó a cabo el ensayo de tracción a 538ºC (1000ºF) de acuerdo con la norma ASTM E21, y se investigaron las influencias que tienen los componentes sobre el límite elástico a alta temperatura. Además, se llevó a cabo un ensayo de tracción a temperatura normal de acuerdo con la norma ASTM E370. Los resultados del mismo se muestran en la Tabla 3. Además, las Figuras 12 y 13 muestran respectivamente los diagramas en los que los resultados del límite elástico a alta temperatura y el alargamiento a temperatura normal se organizan con los contenidos de V.

Tabla 3

Acero N.º	Límite elástico a alta temperatura (MPa)	Alargamiento a temperatura normal (%)
1	295	14,3
25	403	12,5
26	366	13,4
27	346	15,1
28	372	10,2
29	361	10,4
30	325	12,2
31	380	12,0
32	363	13,4
33	347	14,2

Acero N.º	Límite elástico a alta temperatura (MPa)	Alargamiento a temperatura normal (%)
34	385	12,9
35	409	12,1
36	445	10,1

Como se muestra en la Tabla 3 y en las Figuras 12 y 13, el límite elástico a alta temperatura mejora más cuando el contenido de V es mayor, y el alargamiento a temperatura normal mejora más cuando el contenido de V es menor. Se ha encontrado que, en particular, el acero con un contenido de Si de 0,4% o mayor (descrito como alto Si en los dibujos) tiene mayores límite elástico a alta temperatura y alargamiento a temperatura normal que el acero con el contenido de Si menor que 0,4% (descrito como Si bajo en los dibujos).

A partir del estudio anterior, para obtener un límite elástico a alta temperatura y un alargamiento a temperatura normal suficientes, es eficaz que esté contenido 0,4% o más de Si y que esté contenido V en el intervalo de 0,02% a 0,12%.

La presente invención se completa basándose en el hallazgo descrito anteriormente y la esencia de la misma es en los aceros para la rueda mostrados en los siguientes (A) y (B).

(A) Un acero para rueda ferroviaria que comprende: en % en masa, C: de 0,65 a 0,84%; Si: de 0,65 a 1,0%; Mn: de 0,50 a 1,40%; Cr: de 0,02 a 0,13%; S: 0,04% o menor y V: de 0,02 a 0,12%, en donde Fn1 expresado mediante la siguiente fórmula (1) es de 32 a 43 y Fn2 expresado mediante la siguiente fórmula (2) es 3 o mayor y 25 o menor, siendo el resto Fe e impurezas, y P, Cu y Ni en las impurezas son P: 0,05% o menor, Cu: 0,20% o menor y Ni: 0,20% o menor:

$$Fn1 = 2,7 + 29,5 \times C + 2,9 \times Si + 6,9 \times Mn + 10,8 \times Cr + 30,3 \times Mo + 44,3 \times V \cdots (1)$$

$$Fn2 = \exp(0,76) \times \exp(0,05 \times C) \times \exp(1,35 \times Si) \times \exp(0,38 \times Mn) \times \exp(0,77 \times Cr) \times \exp(3,0 \times Mo) \times \exp(4,6 \times V) \cdots (2)$$

donde cada símbolo de elemento en las fórmulas (1) y (2) significa contenido (% en masa) de cada elemento.

(B) El acero para rueda de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende, en % en masa, Mo: 0,07% o menos en lugar de una parte de Fe, y el contenido total de V y Mo es de 0,02 a 0,12%.

"Impurezas" se refiere a componentes que están mezclados en un material de acero a partir de las materias primas tales como menas y chatarra, etc., o por otras causas mientras se fabrica comercialmente el material de acero.

Efectos ventajosos de la invención

El acero para rueda de la presente invención tiene un excelente balance de resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga de contacto por rodadura y resistencia a la fisura térmica, y puede dar una larga vida a la rueda. En comparación con la rueda con el acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" de la AAR, la rueda con el acero para rueda de la presente invención tiene la cantidad de desgaste en la misma extensión o menor y disminuida en un 30% como máximo y la vida a fatiga de contacto por rodadura equivalente a o mayor y aumentada 3,2 veces como máximo y tiene un bajo riesgo de aparición de fisura térmica. Además, el acero para rueda de la presente invención incluye tanto resistencia a alta temperatura como ductilidad, y por lo tanto, tiene un bajo riesgo de aparición de TMS y una grieta sobre la banda de rodadura. Por consiguiente, el acero para rueda de la presente invención es extremadamente favorable para su uso como ruedas ferroviarias que se usan en entornos extremadamente duros donde aumentan las distancias de desplazamiento y aumentan las capacidades de carga.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es una vista que explica esquemáticamente una "rueda monobloque" como un ejemplo de una rueda.

La Figura 2 es un diagrama que organiza y muestra una relación de "dureza a 40 mm" que es la dureza Rockwell C en la posición a 40 mm desde un extremo enfriado con agua y "Fn1" expresado mediante la fórmula (1), con respecto a los aceros 1 a 24. "Bainita" en el dibujo indica que se forma en parte una microestructura bainítica.

La Figura 3 es un diagrama que organiza y muestra una relación de "M50%" que es una distancia desde un extremo enfriado con agua, en unidades de milímetros, donde una fracción de microestructura martensítica resulta ser del 50% y "Fn2" expresado mediante la fórmula (2) con respecto a los aceros 1 a 24.

La Figura 4 es una vista que muestra las configuraciones de "muestra de ensayo de rueda" y "muestra de ensayo de raíl" usadas en el ensayo de fatiga de contacto por rodadura. (a) en el dibujo muestra "muestra de ensayo de rueda" y (b) muestra "muestra de ensayo de raíl". Obsérvese que la unidad de las dimensiones en el dibujo es "mm".

La Figura 5 es una vista que muestra configuraciones de la "muestra de ensayo de rueda" y la "muestra de ensayo de raíl" usadas en el ensayo de desgaste. (a) en el dibujo muestra la "muestra de ensayo de rueda" y (b) muestra la "muestra de ensayo de raíl". Obsérvese que la unidad de las dimensiones en el dibujo es "mm".

La Figura 6 es una vista que explica esquemáticamente un método para un ensayo de fatiga de contacto por rodadura usando la muestra de ensayo de rueda mostrada en la Figura 4(a) y la muestra de ensayo de raíl mostrada en la Figura 4(b).

La Figura 7 es un diagrama que organiza y muestra una relación de la vida a fatiga de contacto por rodadura y "Fn1" expresado mediante la fórmula (1). "Bainita" en el dibujo indica que se forma en parte una microestructura bainítica.

La Figura 8 es una vista que explica esquemáticamente un método para el ensayo del desgaste usando la muestra de ensayo de rueda mostrada en la Figura 5(a) y la muestra de ensayo de raíl mostrada en la Figura 5(b).

La Figura 9 es un diagrama que organiza y muestra una relación de la cantidad de desgaste y "Fn1" expresado mediante la fórmula (1). "Bainita" en el dibujo indica que se forma en parte una microestructura bainítica.

La Figura 10 es un diagrama que organiza y muestra una relación de un espesor de una capa blanca y "Fn2" expresado mediante la fórmula (2), con respecto a cada uno del acero 1, acero 2, acero 5, acero 11, acero 12 y acero 14.

La Figura 11 es un diagrama que organiza y muestra una relación de la vida de inicio de grieta y "Fn2" expresado mediante la fórmula (2), con respecto a cada uno del acero 1, acero 2, acero 5, acero 11, acero 12 y acero 14.

La Figura 12 es un diagrama que organiza un resultado de límite elástico a alta temperatura con el contenido de V.

La Figura 13 es un diagrama que organiza un resultado de alargamiento a temperatura normal con el contenido de V.

La Figura 14 es una vista que explica el equipo usado en un ejemplo para realizar el denominado "templado de la banda de rodadura" para una rueda.

La Figura 15 es una vista que explica una posición de medición de la dureza Brinell de la rueda producida en el ejemplo.

La Figura 16 es una vista que explica una posición donde se examinó una microestructura de una parte de llanta de la rueda producida en el ejemplo.

La Figura 17 es una vista que explica una posición donde se examinó una microestructura de una parte de cubo de la rueda producida en el ejemplo.

La Figura 18 es una vista que explica una posición donde se tomaron una muestra de ensayo de desgaste, una muestra de ensayo de fatiga de contacto por rodadura y una muestra de ensayo de Jominy de la rueda producida en el ejemplo. Con las posiciones mostradas mediante "a", "b" y "c" en el dibujo como las referencias, se tomaron, respectivamente, la muestra de ensayo de desgaste, la muestra de ensayo de fatiga de contacto por rodadura y la muestra de ensayo de Jominy.

Modo para llevar a cabo la invención

En lo sucesivo en la presente memoria, los requisitos respectivos de la presente invención se describirán en detalle. Obsérvese que "%" de un contenido de cada elemento significa "% en masa".

C: de 0,65 a 0,84%

El C aumenta la dureza y mejora la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga de contacto por rodadura. Además, el C en este intervalo tiene una pequeña influencia sobre la capacidad de endurecimiento y puede aumentar la dureza sin reducir demasiado la resistencia a la fisura térmica. Cuando el contenido de C está por debajo de 0,65%, no puede obtenerse una dureza suficiente y una fracción de área de la ferrita aumenta adicionalmente y se reduce la resistencia al desgaste. Cuando el contenido de C supera 0,84%, se forma cementita hiper-eutectoide gruesa en una parte de cubo de la rueda y en ocasiones una tenacidad y vida a fatiga extremadamente reducidas, lo que no es favorable para la seguridad. Por lo tanto, el contenido de C se ajusta de 0,65 a 0,84%. El contenido de C preferiblemente se ajusta a 0,68% o mayor, y preferiblemente se ajusta a 0,82% o menor.

Si: de 0,65 a 1,0%

El Si es un elemento que aumenta la dureza disminuyendo el espaciado lamelar de la perlita y el endurecimiento de la ferrita en disolución sólida en una microestructura perlítica, y que aumenta además la resistencia y ductilidad a alta temperatura. Cuando el contenido de Si está por debajo de 0,4%, los efectos mencionados anteriormente son

insuficientes y es difícil obtener una resistencia y ductilidad a alta temperatura. Cuando el contenido de Si supera el 1,0%, la tenacidad se reduce, la capacidad de endurecimiento aumenta adicionalmente y la resistencia a la fisura térmica se reduce también.

Para aumentar la dureza, la resistencia y la ductilidad a alta temperatura mediante Si, el contenido del mismo se ajusta a 0,65% o mayor. Mientras tanto, el Si aumenta la capacidad de endurecimiento, y por lo tanto, el contenido del mismo se ajusta preferiblemente a 0,90% o menor.

Mn: de 0,50 a 1,40%

El Mn es un elemento que aumenta la dureza disminuyendo el espaciado lamelar de la perlita y la ferrita de endurecimiento en disolución sólida en una microestructura perlítica. El Mn también tiene un efecto de formar MnS para atrapar el S en el acero, y suprimir la fragilidad del límite de grano. Cuando el contenido de Mn es menor que 0,50%, resultan insuficientes los efectos mencionados anteriormente, sobre todo el efecto de atrapamiento de S. Cuando el contenido de Mn supera el 1,40%, se forma una microestructura bainítica para reducir la resistencia al desgaste, la capacidad de endurecimiento aumenta adicionalmente y la resistencia a la fisura térmica también se reduce. Por lo tanto, el contenido de Mn se ajusta de 0,50 a 1,40%. El contenido de Mn se ajuste preferiblemente a 1,20% o menor.

Cr: de 0,02 a 0,13%

El Cr tiene el efecto de aumentar significativamente la dureza de la perlita disminuyendo el espaciado lamelar de la perlita. Cuando el contenido de Cr es menor que 0,02%, estos efectos no son suficientes. Cuando el contenido de Cr supera 0,13%, los carburos son difíciles de disolver en austenita en el momento del calentamiento y, dependiendo de las condiciones de calentamiento, surge la posibilidad de que se formen carburos no disueltos para reducir la dureza, tenacidad, resistencia a la fatiga y similares. Además, cuando se produce la rueda tratada térmicamente, se forma fácilmente una microestructura bainítica con una baja resistencia al desgaste directamente bajo una banda de rodadura. Además, la capacidad de endurecimiento aumenta y la resistencia a la fisura térmica se reduce. Por lo tanto, el contenido de Cr se ajusta a de 0,02 a 0,13%. El contenido de Cr se ajusta preferiblemente a 0,05% o mayor y se ajusta preferiblemente a 0,12% o menor.

S: 0,04% o menor

El S es una impureza normalmente contenida en el acero y tiene una pequeña influencia sobre la dureza y la capacidad de endurecimiento, pero tiene el efecto de mejor la maquinabilidad. Por lo tanto, el S puede estar contenido positivamente pero un contenido excesivo de S reduce la tenacidad del acero. Por lo tanto, el contenido de S se ajusta a 0,04% o menor. El contenido de S se ajusta preferiblemente a 0,03% o menor. Obsérvese que el efecto de mejorar la maquinabilidad es notable cuando el contenido de S es de 0,05% o mayor.

V: de 0,02 a 0,12%

El V precipita sobre la ferrita en perlita como un carburo de V, y tiene el efecto de aumentar significativamente la dureza de la perlita. Además, el V tiene el efecto de aumentar el límite elástico a alta temperatura. Cuando el contenido de V es menor que 0,02%, estos efectos no son suficientes. Cuando está contenido V por encima de 0,12%, el alargamiento a temperatura normal se reduce, además de lo cual, la capacidad de endurecimiento aumenta, y se reduce la resistencia a la fisura térmica. Por lo tanto, cuando está contenido el V, el contenido del mismo se ajusta a de 0,02 a 0,12%. El contenido de V se ajusta preferiblemente a 0,07% o menor y más preferiblemente se ajusta a 0,05% o menor.

Fn1 (hágase referencia a la fórmula (1)): de 32 a 43

Cuando Fn1 es menor que 32, la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga de contacto por rodadura apenas mejoran en comparación con el caso de usar el acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" de la AAR y, dependiendo del caso, la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga de contacto por rodadura se hacen menores que las de la "Clase C". Por lo tanto, el acero con Fn1 que es menor que 32 es difícil de usar como el acero de una rueda ferroviaria usada en entornos extremadamente duros en los que aumentan las distancias de desplazamiento y aumentan las capacidades de carga. Cuando Fn1 supera 43, resulta difícil obtener una microestructura que consiste principalmente en perlita, y se reduce la resistencia al desgaste. Además, la dureza aumenta demasiado, y por lo tanto, se reducen la ductilidad y la tenacidad. Por lo tanto, Fn1 se ajusta para que esté en un intervalo de 32 a 43. Fn1 es preferiblemente 37 o menor, y es más preferiblemente 36 o menor.

Fn2 (hágase referencia a la fórmula (2)): de 3 a 25

Cuando Fn2 supera 25, la capacidad de endurecimiento se hace alta, lo que conduce a una reducción en la resistencia a la fisura térmica. Fn2 es preferiblemente 20 o menor y es más preferiblemente 15 o menor.

Obsérvese que cuando Fn2 es menor que 3, es difícil que Fn1 expresado mediante la fórmula (1) sea de 32 o mayor. Por lo tanto, Fn2 es 3 o mayor.

Uno de los aceros para rueda de la presente invención contiene los elementos descritos anteriormente, el resto consiste en Fe e impurezas, y los contenidos de P, Cu y Ni como las impurezas deberían estar limitados a un cierto intervalo. El intervalo de los contenidos de los elementos respectivos y la razón de limitación son las siguientes.

P: 0,05% o menor

El P es una impureza contenida en el acero. Cuando el contenido de P supera el 0,05%, se reduce la tenacidad. Por consiguiente, el contenido de P en las impurezas se ajusta a 0,05% o menor. El contenido de P, que es más preferible, es de 0,025% o menor.

Cu: 0,20% o menor

El Cu es una impureza contenida en el acero. Cuando el contenido de Cu supera el 0,20%, aumenta la aparición de un defecto superficial en el momento de la producción, la capacidad de endurecimiento aumenta adicionalmente y se reduce la resistencia a la fisura térmica. Por consiguiente, el contenido de Cu en las impurezas se ajusta a 0,20% o menor. El contenido de Cu que es más preferible es de 0,10% o menor.

Ni: 0,20% o menor

El Ni es una impureza contenida en el acero. Cuando el contenido de Ni supera 0,20%, aumenta la capacidad de endurecimiento y se reduce la resistencia a la fisura térmica. Por consiguiente, el contenido de Ni en las impurezas se ajusta a 0,20% o menor. El contenido de Ni que es más preferible es 0,10% o menor.

El acero para rueda de la presente invención puede contener Mo en lugar de parte de Fe, según la necesidad. El intervalo de contenido de Mo y la razón de limitación son las siguientes.

Mo: 0,07% o menor

El Mo tiene un efecto de aumentar la dureza de perlita y tiene el efecto de aumentar el límite elástico a alta temperatura similarmente al V. Cuando el contenido de Mo supera 0,07%, resulta fácil formar una microestructura bainítica directamente bajo una banda de rodadura a una resistencia de desgaste reducida cuando se produce la rueda tratada térmicamente, la capacidad de endurecimiento aumenta adicionalmente y se reduce la resistencia a la fisura térmica. Por lo tanto, cuando el Mo está contenido, el contenido del mismo se ajusta a 0,07% o menor. El contenido de Mo se ajusta preferiblemente a 0,02% o mayor.

Especialmente cuando están contenidos ambos V y Mo, el contenido total (V + Mo) se ajusta a de 0,02 a 0,12%. El límite superior que es más preferible es 0,07% y el límite superior que es mucho más preferible es 0,05%.

El acero para rueda de la presente invención puede contener Al según la necesidad. Un intervalo del contenido de Al y la razón de limitación son las siguientes.

Al: 0,20% o menor

El Al puede estar contenido, porque el Al tiene el efecto de refinar los granos para mejorar la tenacidad. Sin embargo, si el contenido de Al supera el 0,20%, aumentan las inclusiones gruesas, y se reduce la tenacidad y la resistencia a la fatiga. Por consiguiente, cuando el Al está contenido, el contenido del mismo se ajusta a 0,20% o menor. El contenido de Al se ajusta preferiblemente a 0,08% o menor. El efecto de mejorar la tenacidad es notable cuando el contenido de Al es de 0,002% o mayor. En particular, el contenido de Al se ajusta preferiblemente a 0,011% o mayor.

La microestructura de la rueda con el acero para rueda de la presente invención tiene deseablemente 90% o más de la fracción de área de la microestructura perlítica con respecto a la parte de llanta y, más deseablemente, tiene un 100% de microestructura perlítica. La razón es que las microestructuras distintas de la microestructura de perlita, tal como la microestructura de ferrita y bainita, tienen una baja resistencia al desgaste, y por lo tanto, la fracción de área total de las microestructuras distintas de la microestructura de perlita es deseablemente 10% o menor. Además, se desea la microestructura en la que la cementita hiper-eutectoide no precipita. La razón de ello es que la precipitación de la cementita hiper-eutectoide reduce la tenacidad.

Con respecto a la parte de cubo, la microestructura es deseablemente similar a aquella de la parte de llanta, y no resulta especialmente un problema si la fracción de área de las microestructuras distintas de perlita supera el 10%. Sin embargo, es deseable la microestructura en la que la cementita hiper-eutectoide no precipita. La razón de ello es que se da el caso en el que la precipitación de la cementita hiper-eutectoide provoca una reducción extrema de la tenacidad y la vida a fatiga, y debe evitarse al menos la formación de la cementita hiper-eutectoide que pueda observarse mediante un microscopio óptico.

La rueda que adopta el acero para rueda de la presente invención puede producirse realizando secuencialmente los tratamientos descritos en los siguientes apartados <1> a <3>, por ejemplo. Después del tratamiento de <3>, puede realizarse el tratamiento de revenido.

<1> Fusión y colada del acero:

Después de que el acero se funde en un horno eléctrico, un convertidor o similar, el acero se cuela en un lingote. Obsérvese que el lingote puede ser cualquiera de una pieza colada por colada continua, y el lingote se moldea en un molde.

<2> Formación en una rueda:

Para formar el acero en una configuración de rueda predeterminada, el acero se forma por un método apropiado tal como forjado en caliente y mecanizado directamente a partir del lingote o después de que el lingote se forme en las piezas de acero finales. Obsérvese que el acero puede formarse directamente en una configuración de rueda por colada, aunque deseablemente se realiza forjado en caliente.

<3> Templado:

Se adopta un método de templado que da una tensión residual de compresión a la parte de llanta, tal como el "método de templado de banda de rodadura". Obsérvese que la temperatura de calentamiento en el momento del templado se ajusta preferiblemente al punto Ac_3 (punto Ac_3 + 250ºC). Cuando la temperatura de calentamiento es menor que el punto Ac_3, el acero no se transforma en austenita, y la perlita con una alta dureza no puede obtenerse por enfriamiento después del calentamiento en algunos casos, mientras que cuando la temperatura de calentamiento supera (punto Ac_3 + 250ºC), los granos se engrosan y la tenacidad se reduce en algunos casos, lo que no es preferible en el rendimiento de una rueda.

El enfriamiento después del calentamiento se realiza preferiblemente por un método apropiado tal como enfriamiento con agua, enfriamiento con aceite, enfriamiento con agua nebulizada y enfriamiento con aire, de modo que se obtenga la microestructura deseable descrita anteriormente para la rueda, teniendo en cuenta el tamaño de la rueda, la instalación y similares.

En lo sucesivo en la presente memoria, la presente invención se describirá más específicamente según los ejemplos, pero la presente invención no se limita a estos ejemplos.

Ejemplos

Después de que los aceros 37 a 63 de la Tabla 4 se fundieran en un horno eléctrico, los aceros se colaron en moldes de 513 mm de diámetro para producir lingotes, cada uno de los lingotes respectivos se cortó a una longitud de 300 mm y se calentaron a 1200ºC, después de lo cual, los lingotes respectivos se sometieron a forjado en caliente por un método normal para producir ruedas de 965 mm de diámetro. Cada de las ruedas tiene la configuración de "TIPO AAR: B-38" descrito en la norma M-107/M-207 de la AAR.

Tabla 4

Acero	Composición química (% en masa, el resto Fe e impurezas)											Fn1	Fn2
N.º	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al		
37	0,69	0,29*	0,78	0,014	0,011	0,02	0,02	0,09	-	-*	0,024	30,3*	4,7
38	0,57*	0,45	0,82	0,017	0,008	0,03	0,03	0,07	-	0,16*	0,042	34,3	12,2
39	0,88*	0,47	0,81	0,014	0,011	0,02	0,02	0,07	-	-*	0,043	36,4	6,1
40	0,72	0,89	0,83	0,016	0,012	0,03	0,02	0,11	-	0,06	0,045	36,1	14,5
41	0,73	0,48	1,18	0,014	0,009	0,03	0,03	0,11	-	0,08	0,034	38,5	10,4
42	0,79	0,83	1,15	0,013	0,008	0,02	0,02	0,13	-	0,12	0,041	43,1*	20,3
43	0,75	0,49	0,83	0,013	0,012	0,03	0,02	0,13	-	0,04	0,04	35,1	7,8
44	0,71	0,49	0,81	0,015	0,012	0,02	0,03	0,09	-	0,11	0,039	36,5	10,4
45	0,66	0,45	0,68	0,016	0,009	0,03	0,02	0,05	-	0,03	0,035	30,0*	6,3
46	0,79	0,48	0,80	0,014	0,011	0,03	0,02	0,11	0,10*	0,18*	0,041	45,1*	19,4
47	0,71	1,02*	0,82	0,016	0,008	0,02	0,02	0,07	0,10*	0,10*	0,035	40,5	27,1*
48	0,76	0,81	0,79	0,014	0,009	0,03	0,03	0,12	-	0,11	0,043	39,1	16,3
49	0,72	0,48	0,83	0,014	0,034	0,02	0,02	0,10	-	0,08	0,041	35,7	9,1
50	0,73	0,48	0,80	0,015	0,008	0,09	0,02	0,09	-	0,09	-	36,1	9,3
51	0,71	0,47	0,83	0,016	0,012	0,02	0,08	0,09	-	0,09	-	35,7	9,3
52	0,73	0,47	0,80	0,014	0,009	0,02	0,03	0,10	-	0,09	0,091	36,2	9,3
53	0,73	0,67	0,81	0,016	0,008	0,02	0,02	0,11	-	0,02	-	33,8	8,9

Acero	Composición química (% en masa, el resto Fe e impurezas)											Fn1	Fn2
54	0,72	0,68	0,82	0,014	0,009	0,02	0,02	0,10	-	0,04	-	34,4	9,8
55	0,72	0,68	0,83	0,016	0,011	0,02	0,03	0,10	-	0,11	-	37,6	13,6
56	0,72	0,25*	0,81	0,015	0,010	0,02	0,02	0,10	-	0,02	-	32,2	5,0
57	0,72	0,24*	0,81	0,014	0,010	0,03	0,02	0,09	-	0,11	-	36,1	7,4
58	0,74	0,85	0,84	0,014	0,008	0,03	0,02	0,13	0,01	0,04	0,025	36,3	13,2
59	0,70	0,76	0,78	0,016	0,011	0,02	0,03	0,07	-	0,02	0,054	32,6	9,6
60	0,66	0,43	0,62	0,015	0,009	0,03	0,02	0,02	-	0,04	-	29,7*	6,1
61	0,72	0,72	0,81	0,013	0,011	0,02	0,03	0,09	0,03	0,03	-	34,8	10,7
62	0,73	0,73	0,79	0,014	0,008	0,03	0,02	0,11	0,03	0,07	-	37,0	13,2
63	0,73	0,70	0,79	0,016	0,011	0,02	0,02	0,11	0,06*	0,09*	-	38,7	15,2

* significa que no satisface el intervalo reivindicado.

Fn1=2,7+29,5xC+2,9xSi+6,9xMn+10,8xCr+30,3xMo+44,3xV

Fn2=exp(0,76)xexp(0,05xC)xexp(1,35xSi)xexp(0,38xMn)xexp(0,77xCr)xexp(3,0xMo)xexp(4,6xV)

A continuación, después de que las ruedas respectivas se calentaran a 900ºC durante dos horas, las ruedas respectivas se trataron térmicamente por el método que enfría las ruedas inyectando agua desde las boquillas mientras se van rotando las ruedas (lo que se denomina "templado de banda de rodadura") con el uso del equipo mostrado en la Figura 14. Después del tratamiento térmico, se llevó a cabo el tratamiento de templado (tratamiento de enfriado de las ruedas en atmósfera de aire después de mantener las ruedas a 500ºC durante dos horas).

Con respecto a las ruedas producidas de esta manera, se llevaron a cabo un ensayo de dureza de las partes de llanta, un examen de la microestructura de las partes de llanta y partes de cubo, un ensayo de desgaste, un ensayo de fatiga de contacto por rodadura y un ensayo de Jominy. Los resultados se muestran en la Tabla 5. Para los ensayos respectivos, se usó como la referencia el resultado de ensayo del acero 37, que corresponde al acero para rueda ferroviaria de la "Clase C" de la AAR.

[1] Ensayo de dureza de las partes de llanta:

Para cada uno de los aceros, se midió la dureza Brinell (en lo sucesivo en la presente memoria, denominada "HBW") en la posición a 40 mm de la banda de rodadura, de la parte central de la banda de rodadura, de la parte de llanta, como se muestra en la Figura 15.

[2] Examen de la microestructura de las partes de llanta

Para cada uno de los aceros, se examinó la microestructura en la posición a 40 mm de la banda de rodadura, de la parte central de la banda de rodadura, de la parte de llanta, como se muestra en la Figura 16. Obsérvese que la parte central de la banda de rodadura se atacó con nital, y la microestructura se observó con un microscopio óptico con un aumento de 400 veces, y se identificó.

Obsérvese que cuando la microestructura contiene ferrita o es una microestructura bainítica, se midió la fracción de área de la misma, y cuando la microestructura contiene 5% o más de ferrita o microestructura bainítica, se reconoce como una microestructura que contiene ferrita y bainita. Cuando la microestructura contiene ferrita o bainita, en la Tabla 5 se describe como "P + F" o "P + B", lo que se describirá posteriormente.

[3] Examen de la microestructura de la parte de cubo:

Para cada uno de los aceros, se examinó la microestructura en la posición central de la parte de cubo, como se muestra en la Figura 17. Obsérvese que la parte de cubo se atacó con nital, y la microestructura se observó similarmente a la parte de llanta.

[4] Ensayo de desgaste:

Para cada uno de los aceros, se tomó una "muestra de ensayo de rueda" para su uso en la muestra de ensayo de desgaste (la configuración mostrada en la Figura 5(a)), con la posición a 40 mm desde la banda de rodadura, de la parte central de la banda de rodadura, de la parte de llanta (posición mostrada mediante "a" en el dibujo) como la referencia que se muestra en la Figura 18. Con el uso de estas "muestras de ensayo de rueda" y "muestra de ensayo de raíl" del acero 1, el ensayo de desgaste se realizó en las condiciones de la tensión hertziana: 2200 MPa, la razón de deslizamiento: 0,8%, y las revoluciones: 776 rpm en el lado de la rueda y 800 rpm en el lado del raíl mediante la máquina de ensayo de desgaste de tipo Nishihara y el ensayo se llevó a cabo en condiciones secas. Después de realizar el ensayo hasta el número de ciclos de 5 x 10^5 veces, la cantidad de desgaste se obtuvo a partir de la diferencia de masa de la muestra de ensayo antes y después del ensayo.

[5] Ensayo de fatiga de contacto por rodadura:

Para cada uno de los aceros, se tomó la "muestra de ensayo de rueda" para su uso en la muestra de ensayo de fatiga de contacto por rodadura (la configuración mostrada en la Figura 4(a)), con la posición a 40 mm desde la banda de rodadura de la parte central de la banda de rodadura de la parte de llanta (posición mostrada mediante "b" en el dibujo) como la referencia que se muestra en la Figura 18. Con el uso de estas "muestras de ensayo de rueda" y "muestra de ensayo de raíl" del acero 1, el ensayo de fatiga de contacto por rodadura se realizó en las condiciones de la tensión hertziana: 1100 MPa, la razón de deslizamiento: 0,28%, las revoluciones: 1000 rpm en el lado del acero y 602 rpm en el lado del raíl y bajo lubricación con agua, y el número de ciclos de detección de 0,5 G con un acelerómetro se instauró como la vida a fatiga de contacto por rodadura y se evaluó.

[6] Ensayo de Jominy:

Para cada uno de los aceros, se tomó una muestra de ensayo de Jominy con la posición a 40 mm desde la banda de rodadura, de la parte central de la banda de rodadura, de la parte de llanta (posición mostrada mediante "c" en el dibujo) como la referencia como se muestra en la Figura 18, y se austenizó a 900ºC durante 30 minutos en atmósfera de aire, después de lo cual, se realizó el templado final, se realizó a continuación un corte paralelo a 1,0 mm, se midió la distribución de dureza hasta la posición a 50 mm desde el extremo enfriado con agua, y se obtuvo "M50%".

[7] Ensayo de tracción a alta temperatura

Para cada uno de los aceros, de acuerdo con la norma ASTM E21, se llevó a cabo el ensayo de tracción a 538ºC (1000ºF) y se midió el límite elástico a alta temperatura.

[8] Ensayo de tracción a temperatura normal

Para cada uno de los aceros, el ensayo de tracción a temperatura normal se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM E370, y se midió el alargamiento a temperatura normal.

Tabla 5

Acero N.º	Dureza de la parte de llanta (HBW)	Microestructura de la parte de llanta		Microestructura de la parte de cubo		Cantidad de desgaste (g)	Vida fatiga por rodadura (ciclo)	M50% (mm)	Límite elástico a alta temperatura (MPa)	Alargamiento a temperatura normal (%)
		Fase	Hiper-eutéctico θ	Fase	Hiper-eutéctico θ					
37	318	P-	Ninguno	P	Ninguno	0,318	1.865.869	5,2	297	15,2
38	342	P+F	Ninguno	P+F	Ninguno	0,338	2.785.401	10,9	424	15,8
39	366	P	Ninguno	P	Presente	0,253	3.328.765	6,2	381	9,8
40	358	P	Ninguno	P	Ninguno	0,264	3.194.736	14,8	365	14,7
41	382	P	Ninguno	P	Ninguno	0,247	3.917.628	10,2	392	12,8
42	404	P+B	Ninguno	P	Ninguno	0,325	5.857.203	20,5	394	10,3
43	354	P	Ninguno	P	Ninguno	0,281	2.998.457	8,5	351	15,0
44	363	P	Ninguno	P	Ninguno	0,270	3.328.475	11,2	394	12,2
45	305	P	Ninguno	P	Ninguno	0,331	1.643.892	7,4	346	16,3
46	412	P+B	Ninguno	P+B	Ninguno	0,319	5.893.821	18,7	477	9,5
47	389	P	Ninguno	P	Ninguno	0,271	4.875.209	29,3	481	10,3
48	391	P	Ninguno	P	Ninguno	0,234	5.013.493	16,8	403	12,7
49	352	P	Ninguno	P	Ninguno	0,275	3.137.515	10,2	385	13,2
50	353	P	Ninguno	P	Ninguno	0,268	3.174.892	9,3	384	12,9
51	351	P	Ninguno	P	Ninguno	0,279	3.084.952	9,8	385	12,5
52	359	P	Ninguno	P	Ninguno	0,279	3.074.662	9,4	376	12,7
53	346	P	Ninguno	P	Ninguno	0,292	2.543.938	9,5	346	15,8
54	348	P	Ninguno	P	Ninguno	0,284	2.647.392	10,1	366	15,3
55	377	P	Ninguno	P	Ninguno	0,249	3.758.295	14,2	389	12,2
56	322	P	Ninguno	P	Ninguno	0,308	2.093.584	5,4	334	15,4

Acero N.º	Dureza de la parte de	Microestructura de la parte de llanta		Microestructura de la parte de cubo		Cantidad de desgaste (g)	Vida fatiga por rodadura (ciclo)	M50% (mm)	Límite elástico a alta temperatura	Alargamiento a temperatura normal (%)
57	360	P	Ninguno	P	Ninguno	0,269	3.147.213	7,5	375	10,4
58	357	P	Ninguno	P	Ninguno	0,266	3.218.493	12,8	359	15,4
59	332	P	Ninguno	P	Ninguno	0,301	2.184.572	9,5	352	15,8
60	301	P	Ninguno	P	Ninguno	0,335	1.548.329	6,9	346	16,2
61	349	P	Ninguno	P	Ninguno	0,281	2.794.738	10,8	388	14,1
62	369	P	Ninguno	P	Ninguno	0,260	3.514.847	12,9	401	12,8
63	387	P	Ninguno	P	Ninguno	0,243	4.095.948	14,9	433	10,2

Como se muestra en la Tabla 5, los aceros 37 a 39, 42, 45 a 47, 56, 57, 60 y 63 que no satisfagan las condiciones definidas por la presente invención eran inferiores en comparación con los aceros 40, 48, 53 a 55, 58, 59, 61 y 62 que sí satisfacen las condiciones definidas por la presente invención, en uno cualquiera o más de los ensayos del ensayo de desgaste, el ensayo de fatiga de contacto por rodadura, el ensayo de Jominy, el ensayo de tracción a alta temperatura y el ensayo de tracción a temperatura normal.

Aplicabilidad industrial

El acero para rueda de la presente invención tiene un excelente balance de resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga de contacto por rodadura y resistencia a la fisura térmica y puede dar una larga vida a la rueda. La rueda que adopta el acero para rueda de la presente invención tiene la cantidad de desgaste disminuida en un 30% como máximo y la vida fatiga de contacto por rodadura se hace tan larga como 3,2 veces como máximo, y tiene un bajo riesgo de aparición de fisura térmica, en comparación con la rueda que adopta el acero para rueda ferroviaria de "Clase C" de la AAR. Además, la rueda que adopta el acero para rueda de la presente invención incluye tanto resistencia como ductilidad a alta temperatura y, por lo tanto, tiene un bajo riesgo de aparición de TMS y una grieta en la banda de rodadura. Por consiguiente, el acero para rueda de la presente invención es extremadamente preferible para su uso como las ruedas ferroviarias que se usan en entornos extremadamente duros y en los que aumentan las distancias de desplazamiento y aumentan las capacidades de carga.

REIVINDICACIONES

1. Un acero para rueda ferroviaria que comprende: en % en masa,

C: de 0,65 a 0,84%;

Si: de 0,65 a 1,0%;

Mn: de 0,50 a 1,40%;

Cr: de 0,02 a 0,13%;

S: 0,04% o menos y

V: de 0,02 a 0,12%, y opcionalmente comprende

Mo: 0,07% o menos y

Al: 0,20% o menos

en donde Fn1 expresado mediante la siguiente fórmula (1) es de 32 a 43,

Fn2 expresado mediante la siguiente fórmula (2) es 3 o mayor y 25 o menor, y

un contenido total de V y Mo es de 0,02 a 0,12%,

siendo el resto Fe e impurezas, y

P, Cu y Ni en las impurezas son

P: 0,05% o menos,

Cu: 0,20% o menos, y

Ni: 0,20% o menos:

$Fn1 = 2,7 + 29,5 \times C + 2,9 \times Si + 6,9 \times Mn + 10,8 \times Cr + 30,3 \times Mo + 44,3 \times V \cdots (1)$

$Fn2 = \exp(0,76) \times \exp(0,05 \times C) \times \exp(1,35 \times Si) \times \exp(0,38 \times Mn) \times \exp(0,77 \times Cr) \times \exp(3,0 \times Mo) \times \exp(4,6 \times V) \cdots (2)$

donde cada símbolo de elemento en las fórmulas (1) y (2) significa el contenido en % en masa de cada elemento.

2. Uso del acero según la reivindicación 1 para ruedas ferroviarias.

Figura 1

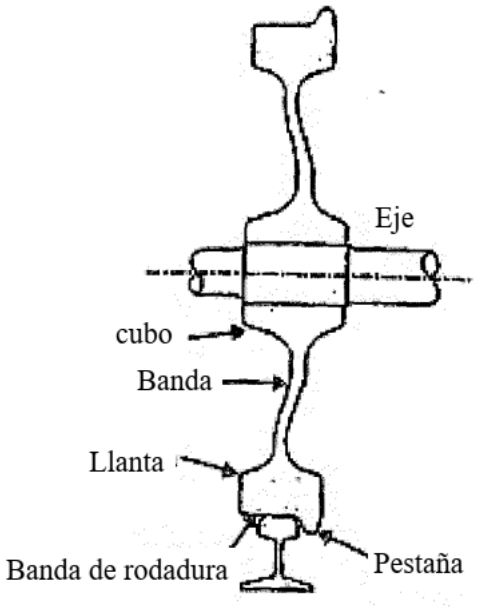

Figura 2

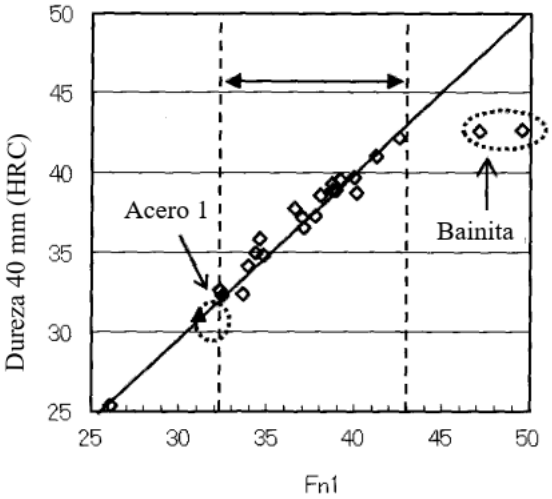

Figura 3

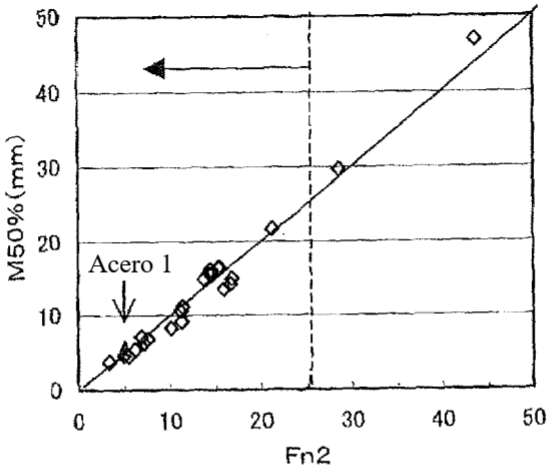

Figura 4

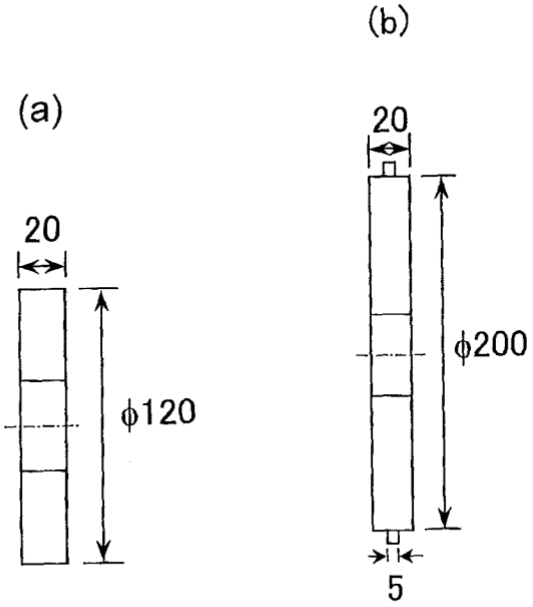

Figura 5

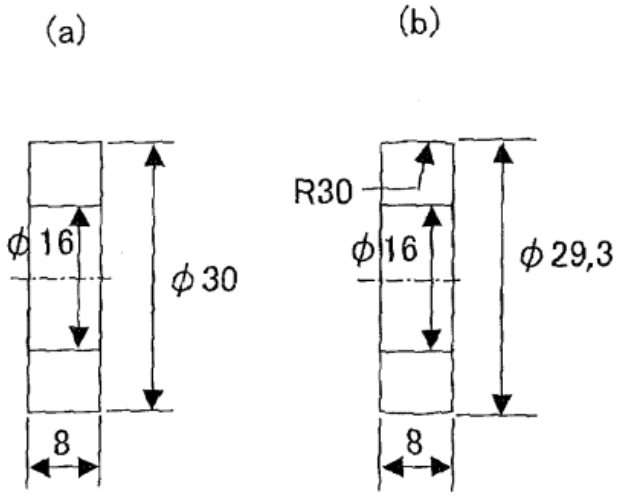

Figura 6

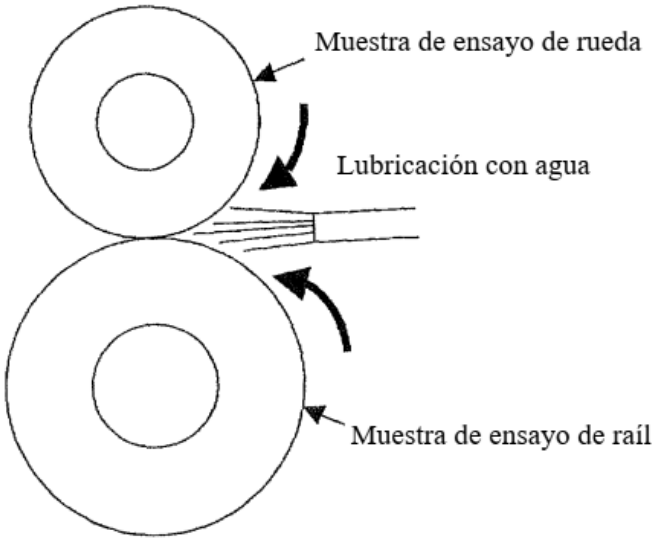

Figura 7

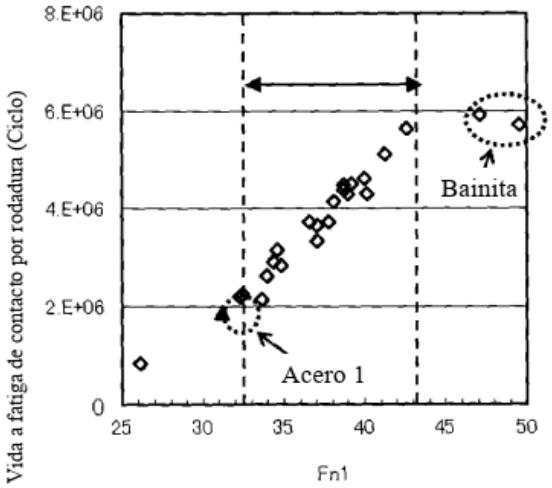

Figura 8

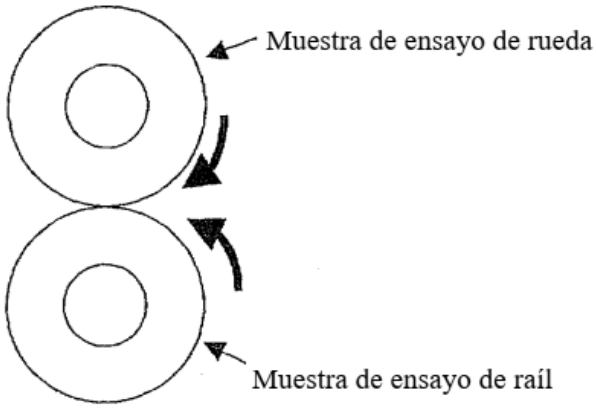

Figura 9

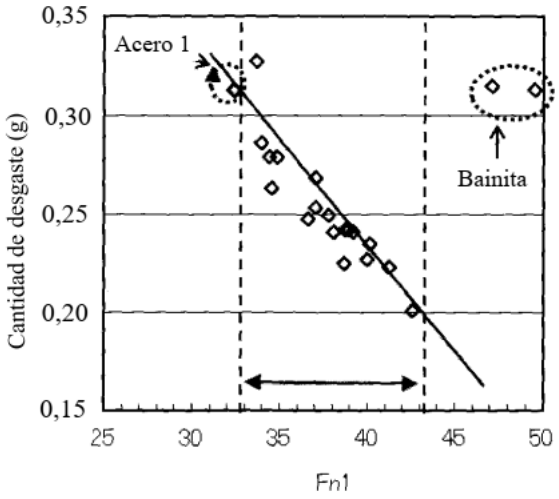

Figura 10

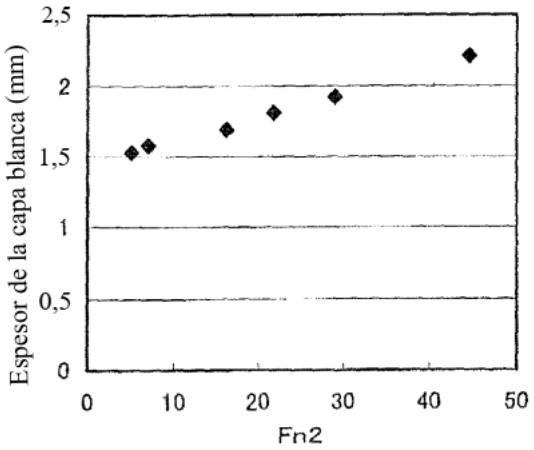

Figura 11

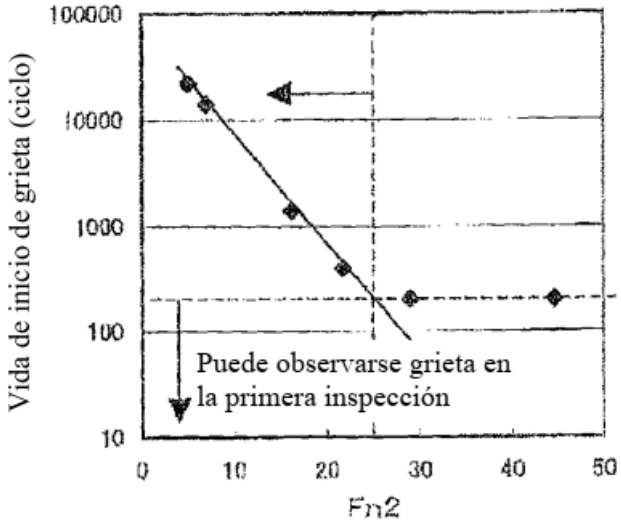

Figura 12

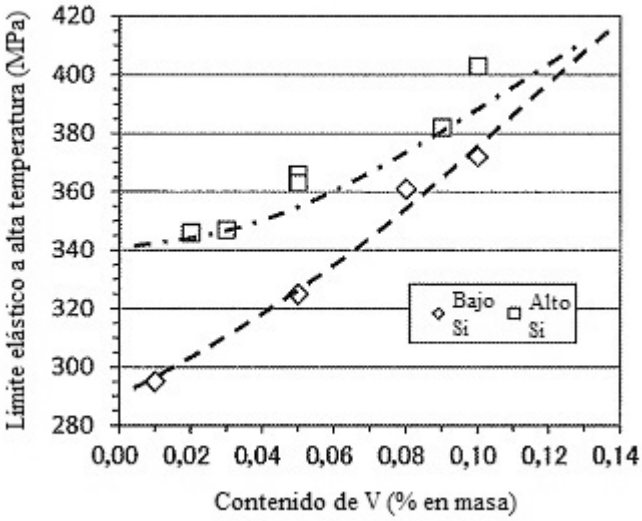

Figura 13

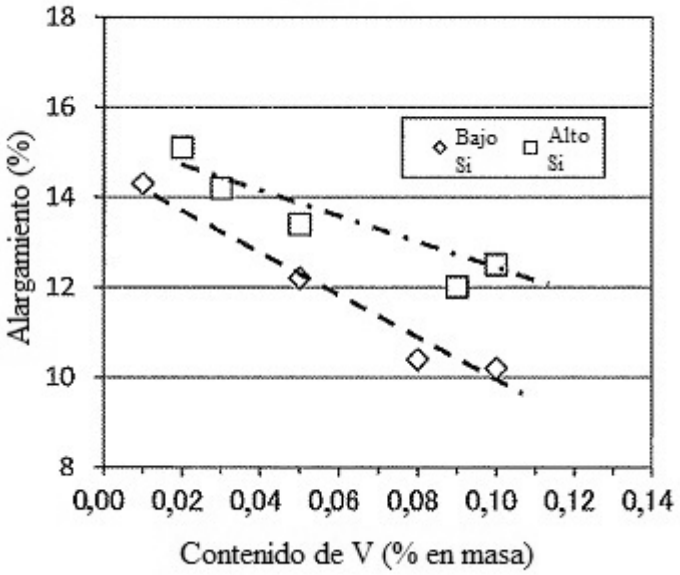

Figura 14

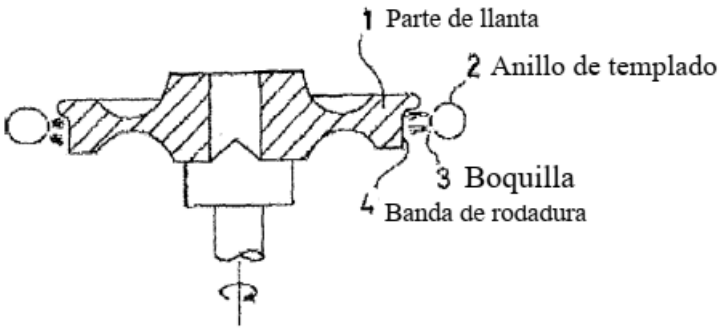

Figura 15

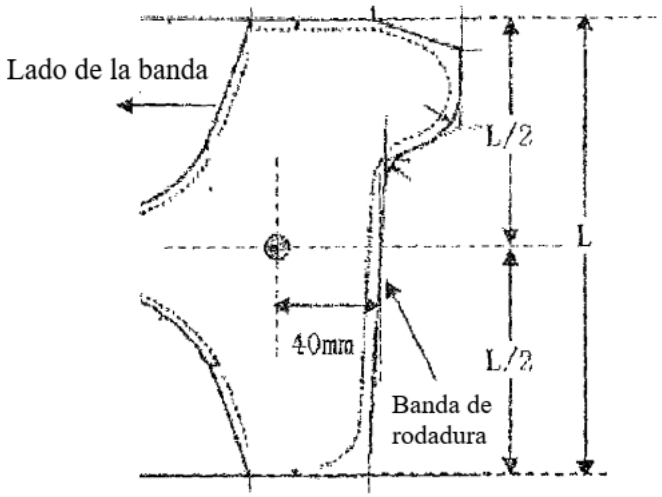

Figura 16

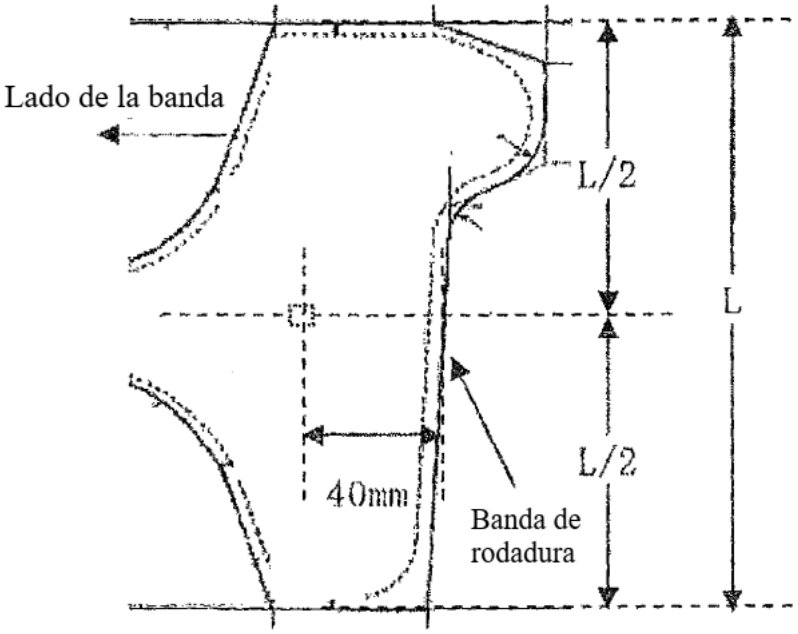

Figura 17

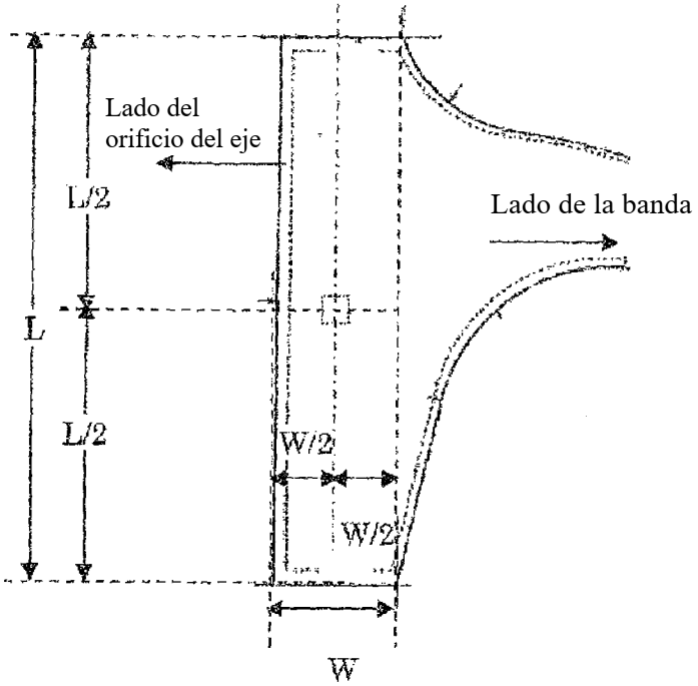
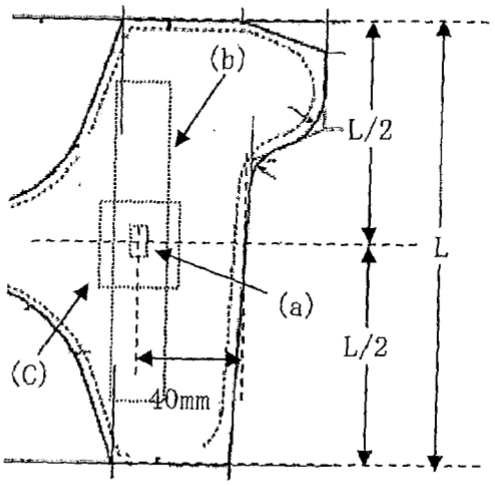
Figura 18