(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 683 118**

(51) Int. CI.:

C22C 38/24 (2006.01) ***C22C 38/26*** (2006.01)
C21D 6/00 (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01)
C22C 38/28 (2006.01)
C22C 38/54 (2006.01)
C22C 38/02 (2006.01)
C22C 38/04 (2006.01)
C22C 38/22 (2006.01)
C22C 38/06 (2006.01)
C22C 38/20 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.03.2009 PCT/JP2009/054706**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **11.09.2009 WO09110640**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.03.2009 E 09717843 (8)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.05.2018 EP 2166120**

(54) Título: **Acero inoxidable ferrítico con excelente resistencia al calor**

(30) Prioridad:

07.03.2008 JP 2008057518

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.09.2018

(73) Titular/es:

JFE STEEL CORPORATION (100.0%)
2-3, Uchisaiwaicho 2-chome Chiyoda-ku
Tokyo 100-0011, JP

(72) Inventor/es:

KATO, YASUSHI;
HIRATA, NORIMASA;
NAKAMURA, TETSUYUKI;
UJIRO, TAKUMI y
OTA, HIROKI

(74) Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

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 inoxidable ferrítico con excelente resistencia al calor

Campo técnico

La presente invención se refiere a aceros que contienen Cr, y particularmente a aceros inoxidables ferríticos que tienen alta resistencia al calor a la fatiga y resistencia a la oxidación y que se usan preferiblemente para componentes de escape utilizados en entornos de alta temperatura, como tubos de escape de automóviles o motocicletas o conductos de aire de escape de cajas convertidoras o plantas de energía térmica.

Antecedentes de la técnica

Los componentes de escape, tales como colectores de escape, tubos de escape, cajas de convertidores y silenciadores utilizados en el entorno de escape de automóviles, deben ser excelentes en términos de resistencia a la fatiga térmica o resistencia a la oxidación (en lo sucesivo, ambas propiedades se denominan colectivamente como "resistencia al calor"). Para aplicaciones que requieren dicha resistencia al calor, los aceros que contienen Cr, a los que se añaden Nb y Si, tales como el Tipo 429 (14Cr-0.9Si-0.4Nb), se utilizan actualmente con frecuencia. Sin embargo, cuando la temperatura de un gas de escape aumenta hasta superar los 900°C con una mejora en el rendimiento del motor, la resistencia a la fatiga térmica del Tipo 429 se vuelve insuficiente.

Para hacer frente a este problema, se han desarrollado aceros que contienen Cr cuya tensión de prueba a alta temperatura se ha mejorado añadiendo Nb y Mo, SUS444 (19Cr-0.5Nb-2Mo) especificados en JIS G4305, aceros inoxidables ferríticos a los que se han añadido Nb, Mo, y W, etc. (por ejemplo, publicación de solicitud de patente japonesa no examinada No. 2004-018921). Sin embargo, debido al aumento inusualmente pronunciado en el precio de las materias primas de metales raros, tales como Mo o W, en la actualidad, se ha requerido cada vez más el desarrollo de materiales que tengan una resistencia al calor equivalente a la de las mismas, usando materias primas de bajo coste.

Como materiales que son excelentes en términos de resistencia al calor y que no contienen elementos costosos, como Mo y W, por ejemplo, la WO 2003/004714 divulga un acero inoxidable ferrítico para componentes de paso de aire de escape de automóviles en donde Nb: 0.50 % en peso o menos, Cu: 0.8 a 2.0 % en peso, y V: 0.03 a 0.20 % en peso se añaden a 10 a 20 % en peso de acero al Cr, la publicación de solicitud de patente japonesa no examinada número 2006-117985 describe un acero inoxidable ferrítico excelente en términos térmicos resistencia a la fatiga en la que Ti: 0.05 a 0.30 % en peso, Nb: 0.10 a 0.60 % en peso, Cu: 0.8 a 2.0 % en peso, y B: 0.0005 a 0.02 % en peso se agregan a 10 a 20 % en peso de acero al Cr. La Publicación de Solicitud de Patente Japonesa sin examinar No. 2000-297355 describe aceros inoxidables ferríticos para partes de aire de escape de automóviles en los cuales se agrega Cu: 1 a 3 % en peso a 15 a 25 % en peso de acero al Cr. Los aceros respectivos han mejorado la resistencia a la fatiga térmica mediante la adición de Cu. Además, el documento US4331474A describe composiciones de acero inoxidable ferríticas que proporcionan alta ductilidad y dureza. Sin embargo, los estudios de los presentes inventores han revelado que, cuando se añade Cu como en las técnicas de Documentos de Patente mencionados anteriormente, la resistencia a la fatiga mejora, pero la resistencia a la oxidación del propio acero disminuye y, por lo tanto, la resistencia al calor en general se deteriora.

Entonces, es un objeto de la presente invención proporcionar un acero inoxidable ferrítico excelente en términos de resistencia a la oxidación y resistencia a la fatiga térmica sin agregar elementos caros, tales como Mo o W, desarrollando una técnica para prevenir la reducción de la resistencia a la oxidación mediante la adición de Cu. Aquí, "excelente resistencia a la oxidación y resistencia a la fatiga térmica" como se usa en la presente invención se refiere a propiedades iguales o superiores a las propiedades de SUS444. Específicamente, la resistencia a la oxidación se refiere a una resistencia a la oxidación a 950°C igual o superior a la resistencia a la oxidación de SUS444 y la resistencia a la fatiga térmica se refiere a una resistencia a la fatiga térmica entre 100 y 850°C igual o superior a la de SUS444.

Divulgación de la invención

1. La presente invención proporciona un acero inoxidable ferrítico que consiste en: C: 0.002 a 0.015 % en peso, Si: 1.0 % en peso o menos, Mn: 0.05 a 1.0 % en peso, P: 0.04 % en peso o menos, S: 0.010 % en peso o menos, Cr: 16 a 23 % en peso, N: 0.015 % en peso o menos, Nb: 0.3 a 0.65 % en peso, Ti: 0.15 % en peso o menos, Mo: 0.1 % en peso o menos, W: 0.1 % en peso o menos, Cu: 1.0 a 2.5 % en peso, Al: 0.2 a 1.5 % en peso, y un equilibrio de Fe e impurezas inevitables, así como opcionalmente uno o dos o más elementos seleccionados de B: 0.003 % en peso o menos, REM: 0.08 % en peso o menos, Zr: 0.5 % en peso o menos, V: 0.5 % en peso o menos, Co: 0.5 % en peso o menos y Ni: 0.5 % en peso o menos.

2. Preferiblemente, en el acero inoxidable ferrítico de la invención, Si es 0.4 a 1.0 % en peso en los componentes de acuerdo con el ítem 1.

3. Más preferiblemente, en el acero inoxidable ferrítico de la invención, Si está en el rango de 0.4 a 1.0 % en peso y Ti está en el rango de 0.01 % en peso o más bajo en los componentes de acuerdo con el ítem 1.

Según la invención, un acero inoxidable ferrítico que tiene resistencia al calor (resistencia a la fatiga térmica y resistencia a la oxidación) igual o superior a la de SUS444 se puede obtener a bajo coste sin añadir los costosos Mo o W. Por lo tanto, el acero de la invención es utilizado con preferencia para componentes de escape de automóviles.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una vista que ilustra una muestra de ensayo de fatiga térmica.

La figura 2 es una vista que ilustra temperaturas y condiciones de restricción en una prueba de fatiga térmica.

La figura 3 es un gráfico que ilustra las influencias de la cantidad de adición de Cu sobre la resistencia a la fatiga térmica.

La figura 4 es un gráfico que ilustra las influencias de la cantidad de adición de Al sobre la resistencia a la oxidación (ganancia de peso por oxidación).

La figura 5 es un gráfico que ilustra las influencias de la cantidad de adición de Si sobre la resistencia a la oxidación por vapor de agua (ganancia de peso por oxidación).

Mejores modos para llevar a cabo la invención

Los presentes inventores han llevado a cabo una amplia investigación para desarrollar un acero inoxidable ferrítico excelente en términos de resistencia a la oxidación y resistencia a la fatiga sin agregar un elemento caro, como Mo o W, a la vez que previene la reducción en la resistencia a la oxidación debido a la adición de Cu, que plantea problemas en las técnicas anteriores. Como resultado, los presentes inventores descubrieron que la alta resistencia a alta temperatura se obtiene en un amplio rango de temperatura y la resistencia a la fatiga térmica mejora al agregar Nb en el rango de 0.3 a 0.65 % en peso y Cu en el rango de 1.0 a 2.5 % en peso; la reducción en la resistencia a la oxidación debido a la adición de Cu se puede prevenir añadiendo una cantidad apropiada de Al (0.2 a 1.5 % en peso); y de este modo se puede obtener una resistencia al calor igual o superior a la de SUS444 sin agregar Mo o W solo cuando las cantidades de Nb, Cu y Al se ajustan para estar dentro de los intervalos apropiados mencionados anteriormente. Por lo tanto, se ha desarrollado la invención.

Los presentes inventores han llevado a cabo adicionalmente una extensa investigación sobre un método para mejorar la resistencia a la oxidación en un ambiente que contiene vapor de agua, que es el entorno en donde la invención está realmente destinada a usarse como colector de escape o similares. Como resultado, los inventores encontraron que, al optimizar la cantidad de Si (0.4 a 1.0 % en peso), la resistencia a la oxidación en una atmósfera de vapor de agua (en lo sucesivo denominada resistencia a la oxidación por vapor de agua) también se iguala o supera al SUS444. Por lo tanto, se ha desarrollado la presente invención.

En primer lugar, se describirán los experimentos fundamentales que conducen al desarrollo de la invención.

Aceros formados añadiendo Cu en diferentes cantidades en el intervalo de 0 a 3 % en peso a una base que contiene C: 0.005 a 0.007 % en peso, N: 0.004 a 0.006 % en peso, Si: 0.3 % en peso, Mn: 0.4 % en peso, Cr: 17 % en peso, Nb: 0.45 % en peso, y Al: 0.35 % en peso se fundieron en condiciones de laboratorio para formar lingotes de acero de 50 kg. Luego, los lingotes de acero se calentaron a 1170°C, y se laminaron en caliente para formar barras de lámina con un espesor de 30 mm y una anchura de 150 mm. A continuación, las barras de lámina se forjaron para formar barras que tienen una sección transversal de 35 mm x 35 mm. Las barras se templaron a una temperatura de 1030°C, y luego se maquinaron, fabricando así muestras de prueba de fatiga térmica que tienen dimensiones como se muestra en la figura 1. Luego, las muestras de prueba se sometieron repetidamente a tratamiento térmico en donde se realizaron calentamiento y enfriamiento entre 100°C y 850°C a una relación de retención de 0.35 como se muestra en la figura 2, y luego se midió la vida de fatiga térmica. La vida de fatiga térmica se determinó como el menor número posible de ciclos hasta que se comienza a medir un esfuerzo, que se calculó dividiendo una carga detectada a 100°C por la sección transversal de una porción paralela de inmersión de la muestra de prueba mostrada en la figura 1 comienza a disminuir continuamente en relación con el estrés de un ciclo anterior. Esto es equivalente a la cantidad de ciclos posibles hasta que se formen grietas en la muestra de prueba. Para comparación, se realizó la misma prueba para SUS444 (acero que contiene Cr: 19 % en peso, Mo: 2 % en peso, y Nb: 0.5 % en peso).

La figura 3 muestra los resultados de la prueba de fatiga térmica. La figura 3 muestra que, al agregar Cu en una cantidad superior a 1.0 % en peso, se obtiene una vida de fatiga térmica igual o superior a la vida de fatiga térmica de

SUS444 (aproximadamente 1100 ciclos), y por lo tanto es efectiva para la mejora de la resistencia a la fatiga térmica para agregar Cu en una cantidad de 1 % en peso o más.

A continuación, los aceros formados añadiendo Al en diferentes cantidades en el intervalo de 0 a 2 % en peso a una base que contiene C: 0.006 % en peso, N: 0.007 % en peso, Mn: 0.4 % en peso, Si: 0.3 % en peso, Cr: 17 % en peso, Nb: 0.49 % en peso, y Cu: 1.5 % en peso se fundieron en condiciones de laboratorio para formar lingotes de acero de 50 kg. A continuación, los lingotes de acero se sometieron a laminado en caliente, recocido laminado en caliente, laminado en frío y recocido final para formar láminas recocidas laminadas en frío con un espesor de 2 mm. Se cortaron muestras de ensayo de 30 mm x 20 mm a partir de láminas de acero laminadas en frío obtenidas como se describió anteriormente. Luego, se formó un agujero de 4 mmφ en la parte superior de cada uno de los especímenes de prueba. Luego, la superficie frontal y la superficie final de cada una de las muestras de prueba se pulieron con papel de lija #320, se desengrasaron y se sometieron a las siguientes pruebas.

Prueba de oxidación continua en aire

La muestra de ensayo se mantuvo durante 300 horas en un horno con aire atmosférico calentado a 950°C. Luego, se midió la diferencia en la masa de la muestra de prueba entre antes y después de la prueba de calentamiento para determinar el aumento de peso por oxidación (g/m^2) por unidad de área.

La figura 4 muestra la relación entre la ganancia de peso por oxidación y el contenido de Al en la prueba de oxidación en el aire atmosférico. La figura 4 muestra que, al añadir Al en una cantidad de 0.2 % en peso o más, se obtiene una resistencia a la oxidación igual o superior a la de SUS444 (ganancia de peso por oxidación: 27 g/m^2 o menos).

A continuación, los aceros formados añadiendo Si en diferentes cantidades en el intervalo de 1.2 % en peso o menos a una base que contiene C: 0.006 % en peso, N: 0.007 % en peso, Mn: 0.2 % en peso, Al: 0.45 % en peso, Cr: 17 % en peso, Nb: 0.49 % en peso, y Cu: 1.5 % en peso se fundieron en condiciones de laboratorio para formar lingotes de acero de 50 kg. A continuación, los lingotes de acero se sometieron a laminado en caliente, recocido laminado en caliente, laminado en frío y recocido final para formar láminas recocidas laminadas en frío con un espesor de 2 mm. Se cortaron muestras de ensayo de 30 mm x 20 mm a partir de láminas de acero laminadas en frío obtenidas como se describió anteriormente. Luego, se formó un agujero de 4 mmφ en la parte superior de cada uno de los especímenes de prueba. Luego, la superficie frontal y la superficie final de cada una de las muestras de prueba se pulieron con papel de lija #320, se desengrasaron y se sometieron a la siguiente prueba de oxidación continua en una atmósfera de vapor de agua.

Prueba de oxidación continua en atmósfera de vapor de agua

La muestra de prueba se mantuvo durante 300 horas en un horno calentado a 950°C cuya atmósfera se transformó en una atmósfera de vapor de agua haciendo que burbujear un gas que contenía 7 % de volumen de CO_2, 1 % de volumen de O_2 y un balance de N_2 en flujo de 0.5 L/min en agua destilada mantenida a 60°C. Luego, se midió la diferencia en masa de la muestra de prueba entre antes y después de la prueba de calentamiento para determinar el aumento de peso debido a la oxidación (g/m^2) por unidad de área.

La figura 5 ilustra la relación entre la ganancia de peso por oxidación y el contenido de Si en la prueba de oxidación continua en una atmósfera de vapor de agua. La figura 5 muestra que, al agregar Si en una cantidad de 0.4 % en peso o más, se obtiene una resistencia a la oxidación igual o superior a la de SUS444 (ganancia de peso debido a la oxidación: 51 g/m^2 o menos).

La invención se ha llevado a cabo realizando estudios adicionales basados en los hallazgos descritos anteriormente.

A continuación, se describirá la composición del componente del acero inoxidable ferrítico de la presente invención.

C: 0.002 a 0.015 % en peso

El C es un elemento que es efectivo para aumentar la resistencia de un acero. Sin embargo, cuando el contenido de C excede el 0.015 % en peso, se hacen evidentes reducciones en la tenacidad y la conformabilidad. Por lo tanto, en la invención, el contenido de C es 0.015 % en peso o menos. Desde el punto de vista de asegurar la conformabilidad, el contenido de C es preferiblemente más bajo, y preferiblemente de 0.008 % en peso o menos. Por el contrario, para asegurar la resistencia de los componentes del escape, el contenido de C es 0.002 % en peso o más y más preferiblemente en el intervalo de 0.002 a 0.008 % en peso.

Si: 1.0 % en peso o menos

El Si es un elemento que se agrega como material de desoxidación. Para obtener el efecto, el contenido de Si es preferiblemente 0.05 % en peso o más. Además, aunque el Si tiene un efecto de mejora de la resistencia a la oxidación, que es un objeto principal de la invención, el efecto no es tan alto como el ejercido por Al. En contraste, la adición en

una cantidad excesiva que excede 1.0 % en peso reduce la facilidad de trabajarlo. Por lo tanto, el límite superior de la cantidad de Si es 1.0 % en peso.

Sin embargo, el Si también es un elemento importante que aumenta la resistencia a la oxidación (resistencia a la oxidación por vapor de agua) en una atmósfera de vapor de agua. Como se muestra en la figura 5, para obtener una resistencia a la oxidación por vapor de agua igual a la de SUS444, se debe agregar Si en una cantidad de 0.4 % en peso o más. Por lo tanto, cuando se enfatiza el efecto, el contenido de Si está preferiblemente en el rango de 0.4 % en peso o más. Más preferiblemente, el contenido de Si está en el intervalo de 0.4 a 0.8 % en peso.

La razón por la que el Si aumenta la resistencia a la oxidación por vapor de agua como se describió anteriormente aún no se ha elucidado por completo. Sin embargo, se especula que, al agregar Si en una cantidad de 0.4 % en peso o más, se forma continuamente una densa fase de óxido de Si sobre la superficie de la lámina de acero para suprimir la entrada de componentes de gas (H_2O, CO_2 y O_2) del exterior, lo que aumenta la resistencia a la oxidación por vapor de agua. Cuando se requiere una resistencia a la oxidación por vapor de agua más estricta, el contenido de Si es preferiblemente de 0.5 % en peso o más.

Mn: 0.05 a 1.0 % en peso

El Mn es un elemento que aumenta la resistencia de un acero y también actúa como un desoxidante. Por lo tanto, se agrega Mn en una cantidad de 0.05 % en peso o más. Sin embargo, cuando se agrega Mn excesivamente, es probable que se forme una fase γ a altas temperaturas, reduciendo la resistencia al calor. Por lo tanto, en la invención, el contenido de Mn es 1.0 % en peso o menos. Preferiblemente, el contenido de Mn es 0.7 % en peso o menos.

P: 0.040 % en peso o menos

El P es un elemento nocivo que reduce la tenacidad y, por lo tanto, el contenido de P se reduce preferiblemente tanto como sea posible. Por lo tanto, en la invención, el contenido de P es 0.040 % en peso o menos. Preferiblemente, el contenido de P es 0.030 % en peso o menos.

S: 0.010 % en peso o menos

Puesto que el S es también un elemento nocivo que reduce la elongación y un valor r, afecta adversamente la conformabilidad y reduce la resistencia a la corrosión, que es una de las propiedades básicas de un acero inoxidable, el contenido de S se reduce preferiblemente tanto como sea posible. Por lo tanto, en la invención, el contenido de S es 0.010 % en peso o menos. Preferiblemente, el contenido de S es 0.005 % en peso o menos.

Cr: 16 a 23 % en peso.

El Cr es un elemento importante eficaz para aumentar la resistencia a la corrosión y la resistencia a la oxidación, que son características de un acero inoxidable. Sin embargo, cuando el contenido de Cr es inferior a 16 % en peso, no se obtiene suficiente resistencia a la oxidación. En contraste, el Cr es un elemento que en la solución sólida fortalece el acero a temperatura ambiente, endurece el acero y reduce la ductilidad de un acero. En particular, cuando se agrega Cr en una cantidad que excede el 23 % en peso, se hacen evidentes efectos adversos. Por lo tanto, el límite superior del contenido de Cr es 23 % en peso. Por lo tanto, el contenido de Cr está en el rango de 16 a 23 % en peso. Más preferiblemente, el contenido de Cr está en el intervalo de 16 a 20 % en peso.

N: 0.015 % en peso o menos

El N es un elemento que reduce la tenacidad y la conformabilidad de un acero. Cuando se agrega N en una cantidad que excede el 0.015 % en peso, la reducción se vuelve notable. Por lo tanto, el contenido de N es 0.015 % en peso o menos. Desde el punto de vista de asegurar la tenacidad y la conformabilidad, el contenido de N se reduce tanto como sea posible y el contenido de N es preferiblemente inferior al 0.010 % en peso.

Nb: 0.3 a 0.65 % en peso

El Nb es un elemento que ejerce acciones de formación de un nitruro de carbono junto con C y N para fijar, aumentar la resistencia a la corrosión o conformabilidad, o la resistencia a la corrosión en el límite de grano de una zona de soldadura y aumentar la resistencia a alta temperatura para mejorar la resistencia a la fatiga térmica. Dichos efectos se observan cuando se agrega Nb en una cantidad de 0.3 % en peso o más. Por el contrario, cuando se agrega Nb en una cantidad que excede el 0.65 % en peso, es probable que precipite una fase de Laves, acelerando la fragilización. Por lo tanto, el contenido de Nb está en el rango de 0.3 a 0.65 % en peso. Preferiblemente, el contenido de Nb está en el rango de 0.4 a 0.55 % en peso.

Ti: 0.15 % en peso o menos

El Ti tiene acciones de fijación de C y N para aumentar la resistencia a la corrosión o la conformabilidad, o la resistencia a la corrosión de límite de grano de una zona de soldadura de forma similar a Nb. Sin embargo, tales efectos están saturados en el sistema componente que contiene Nb de la invención, cuando el contenido de Ti excede 0.15 % en peso y un acero se endurece debido al endurecimiento de la solución sólida. Por lo tanto, el límite superior del contenido de Ti es 0.15 % en peso en la invención.

En la invención, el Ti es un elemento que no necesita ser particularmente agregado de forma positiva. Sin embargo, es más probable que Ti se combine con N en comparación con Nb, y es probable que forme TiN grueso. El TiN grueso probablemente sirva como causa del desarrollo de grietas y reduzca la dureza de una lámina laminada en caliente. Por lo tanto, cuando se requiere una mayor tenacidad, el contenido de Ti se limita preferiblemente a 0.01 % en peso o menos.

Mo: 0.1 % en peso o menos

El Mo es un elemento costoso, y por lo tanto no se agrega positivamente a la vista del objeto de la invención. Sin embargo, 0.1 % en peso o menos de Mo se entremezcla a veces proveniente de chatarra como materia prima. Por lo tanto, el contenido de Mo es 0.1 % en peso o menos.

W: 0.1 % en peso o menos

El W es un elemento caro similar al Mo, y por lo tanto no se agrega positivamente a la vista del objeto de la invención. Sin embargo, 0.1 % en peso o menos de W se entremezcla a veces proveniente de chatarra como materia prima. Por lo tanto, el contenido de W es 0.1 % en peso o menos.

Cu: 1.0 a 2.5 % en peso

El Cu es un elemento que es muy eficaz para mejorar la resistencia a la fatiga térmica. Como se muestra en la figura 3, para obtener una resistencia a la fatiga térmica igual o superior a la de SUS444, se necesita agregar Cu en una cantidad de 1.0 % en peso o más. Sin embargo, cuando se agrega Cu en una cantidad que excede 2.5 % en peso, el ε-Cu precipita durante el enfriamiento después del tratamiento térmico, endureciendo así el acero y causando fácilmente fragilización durante el trabajo en caliente. Es más importante que la adición de Cu aumente la resistencia a la fatiga térmica del acero, pero reduzca la resistencia a la oxidación del propio acero y, en general, reduce la resistencia al calor del mismo. La causa de esto aún no ha sido completamente esclarecida. Sin embargo, se especula que el Cu se concentra en una capa eliminada de Cr directamente debajo de las incrustaciones generadas, suprimiendo así la redifusión de Cr que es un elemento que mejora la resistencia a la oxidación inherente a un acero inoxidable. Por lo tanto, el contenido de Cu está en el rango de 1.0 a 2.5 % en peso. Más preferiblemente, el contenido de Cu está en el intervalo de 1.1 a 1.8 % en peso.

Al: 0.2 a 1.5 % en peso

El Al es un elemento indispensable para mejorar la resistencia a la oxidación de un acero con adición de Cu como se muestra en la figura 4. En particular, para obtener una resistencia a la oxidación igual o superior a la de SUS444, que es el objeto de la invención, el Al debe agregarse en una cantidad de 0.2 % en peso o más. Por el contrario, cuando se agrega Al en una cantidad que excede 1.5 % en peso, el acero se endurece, lo que reduce la facilidad de trabajarlo. Por lo tanto, el límite superior es 1.5 % en peso. Por lo tanto, el contenido de Al está en el rango de 0.2 a 1.5 % en peso. Cuando se usa a temperaturas más altas, el contenido de Al está preferiblemente en el rango de 0.3 a 1.0 % en peso.

El Al también es un elemento que se disuelve a altas temperaturas y la solución sólida refuerza un acero. En particular, el efecto de aumentar la resistencia de un acero a temperaturas superiores a 800°C es grande. Sin embargo, como se describió anteriormente, cuando la cantidad de adición de Si es insuficiente, los componentes del gas que entran en un acero y Al se unen entre sí, y así el Al no contribuye eficazmente como un elemento de refuerzo en solución sólida. Por lo tanto, con el fin de desarrollar suficientemente el efecto de Al descrito anteriormente en una atmósfera de vapor de agua, se añade preferiblemente Si en una cantidad de 0.4 % en peso o más.

El acero inoxidable ferrítico de la invención puede contener adicionalmente, además de los ingredientes esenciales mencionados anteriormente, uno o dos o más elementos seleccionados entre B, REM, Zr, V, Co y Ni en los siguientes rangos.

B: 0.003 % en peso o menos

El B es un elemento que es efectivo para aumentar la facilidad de trabajarlo, particularmente facilidad de trabajarlo secundaria. El efecto es notable cuando se agrega B en una cantidad de 0.0005 % en peso o más. Sin embargo, la adición de B en una cantidad que excede 0.003 % en peso genera BN y reduce la facilidad de trabajarlo. Por lo tanto,

cuando se agrega B, la cantidad de adición es 0.003 % en peso o menos. Más preferiblemente, la cantidad de adición de B está en el intervalo de 0.0005 a 0.002 % en peso.

REM: 0.08 % en peso o menos, Zr: 0.5 % en peso o menos

Cada uno de REM (metales de tierras raras) y Zr son elementos que mejoran la resistencia a la oxidación. Con el fin de obtener el efecto, cada uno de los REM y Zr se añaden preferiblemente en una cantidad de 0.01 % en peso o más y 0.05 % en peso o más, respectivamente. Sin embargo, la adición de un REM en una cantidad que excede el 0.08 % en peso provoca la fragilización del acero y la adición de Zr en una cantidad superior al 0.50 % en peso precipita un compuesto intermetálico de Zr que provoca la fragilización del acero. Por lo tanto, se agrega un REM en una cantidad de 0.08 % en peso o menos y se agrega Zr en una cantidad de 0.5 % en peso o menos.

V: 0.5 % en peso o menos

El V es un elemento que es efectivo para mejorar la facilidad de trabajarlo. En particular, para obtener el efecto de mejorar la resistencia a la oxidación, el V se añade preferiblemente en una cantidad de 0.15 % en peso o más. Sin embargo, cuando se agrega excesivamente V en una cantidad que excede 0.5 % en peso, se precipita V(C, N) grueso, deteriorando de ese modo la calidad superficial de la lámina de acero. Por lo tanto, el V se añade preferiblemente en una cantidad de 0.50 % en peso o menos y más preferiblemente en el intervalo de 0.15 a 0.4 % en peso.

Co: 0.5 % en peso o menos

El Co es un elemento que es efectivo para mejorar la tenacidad, y se añade preferiblemente en una cantidad de 0.02 % en peso o más. Sin embargo, el Co es un elemento costoso. Incluso cuando se agrega Co en una cantidad que excede 0.5 % en peso, el efecto es saturado. Por lo tanto, el Co se agrega preferiblemente en una cantidad de 0.5 % en peso o menos. Más preferiblemente, se agrega Co en el intervalo de 0.02 a 0.2 % en peso.

Ni: 0.5 % en peso o menos

El Ni es un elemento para aumentar la tenacidad. Con el fin de obtener el efecto, preferiblemente se añade Ni en una cantidad de 0.05 % en peso o más. Sin embargo, el Ni es caro. Además, dado que el Ni es un poderoso elemento de formación de fase γ, el Ni forma una fase γ a altas temperaturas, lo que reduce la resistencia a la oxidación. Por lo tanto, se agrega Ni en una cantidad de 0.5 % en peso o menos. Más preferiblemente, se añade Ni en el intervalo de 0.05 a 0.4 % en peso.

A continuación, se describirá un método para producir un acero inoxidable ferrítico de la invención.

Como método para producir el acero inoxidable de la invención, puede usarse cualquier método preferiblemente sin limitación en la medida en que el método sea un método común para producir un acero inoxidable ferrítico. Por ejemplo, el método preferiblemente, por ejemplo, incluye: fundir un acero en un horno de fundición conocido, tal como un convertidor o un horno eléctrico, o realizar adicionalmente refinamiento secundario, tal como refinamiento de cucharón o refinamiento al vacío, para formar un acero que tenga la composición de componentes mencionada anteriormente de la invención; conformar el acero fundido en un desbaste mediante un proceso de colada continua o un proceso de fabricación de lingotes; someter el resultante a laminación en caliente para formar una lámina laminada en caliente; recocer la lámina laminada en caliente según sea necesario; lavar la hoja laminada en caliente con ácido; laminar en frío el resultante; someter el resultante para terminar el recocido; y lavar el resultante con ácido, obteniendo de ese modo una lámina recocida laminada en frío. El proceso de laminado en frío se puede realizar una o dos veces o más con un recocido intermedio realizado entre los procesos de laminación en frío y cada proceso de laminado en frío, recocido finalizado y lavado con ácido se puede realizar repetidamente. Además, dependiendo del caso, puede omitirse el proceso de recocido de la hoja laminada en caliente. Cuando se requiere que la superficie de la lámina de acero sea brillante, se puede realizar la laminación de endurecimiento después del laminado en frío o el recocido del acabado. Es preferible que la temperatura de calentamiento del desbaste antes de que el laminado en caliente esté en el rango de 1000 a 1250°C, que la temperatura de recocido de la hoja laminada en caliente esté en el rango de 900 a 1100°C, y que esté en el rango de 900 a 1120°C.

El acero inoxidable ferrítico de la invención obtenido como se describió anteriormente se somete a corte, flexión, prensado o similar de acuerdo con la aplicación para ser conformado en diversos componentes de escape usados en ambientes de alta temperatura, tales como tubos de escape de automóviles o motocicletas o conductos de aire de escape de cajas convertidoras o plantas de energía térmica. El acero inoxidable de la invención utilizado para los componentes mencionados anteriormente no está limitado a una lámina recocida laminada en frío, y puede usarse como una lámina laminada en caliente o lámina recocida laminada en caliente, y además, puede someterse a un tratamiento de desincrustación, según sea necesario, para su uso. No hay ninguna limitación en un proceso de soldadura para obtener los componentes antes mencionados, y puede utilizarse soldadura de arco usual, como MIG (Metal Gas Inerte), MAG (Metal Gas Activo) o TIG (Tungsteno Gas Inerte); soldadura de resistencia eléctrica, como

soldadura por puntos o soldadura de costura; soldadura por resistencia de alta frecuencia, soldadura por inducción de alta frecuencia o soldadura por láser utilizada para soldadura por resistencia eléctrica; o similares.

Ejemplo 1

Los aceros No. 1 a No. 24 que tienen una cualquiera de las composiciones componentes mostradas en las Tablas 1-1 y 1-2 se fundieron en un horno de fundición al vacío y se moldearon en un lingote de acero de 50 kg. El lingote de acero fue forjado y luego reducido a la mitad. A continuación, uno de los lingotes de acero reducido a la mitad se calentó a 1170°C y se laminó en caliente para obtener una lámina laminada en caliente de 5 mm de espesor. Luego, la lámina laminada en caliente se recoció a una temperatura de 1020°C, se lavó con ácido, se laminó en frío con una reducción de laminación del 60 %, se sometió a un recocido de acabado a una temperatura de 1030°C, se enfrió a una tasa de enfriamiento promedio de 20°C/seg, y se lavó con ácido para obtener una lámina laminada en frío de 2 mm de espesor. Luego, la lámina laminada en frío se sometió a los siguientes dos tipos de pruebas de resistencia a la oxidación. A título de referencia, también con respecto a SUS444 y a los aceros de las invenciones descritas en el documento WO 2003/004714 y en las publicaciones de solicitudes de patente japonesa no examinadas números 2006-117985 y 2000-297355 que se indican como No. 25 a No. 28 de la Tabla 1, se produjeron láminas recocidas laminadas en frío de la misma manera que anteriormente, y luego se sometieron a la siguiente prueba de oxidación continua en el aire y prueba de oxidación continua en una atmósfera de vapor de agua.

Prueba de oxidación continua en aire

Se recortaron muestras (30 mm x 20 mm) de diversas láminas recocidas laminadas en frío obtenidas como se describió anteriormente. Luego, se formó un orificio de 4 mmφ en la parte superior de cada muestra. La superficie frontal y la superficie final se pulieron con papel de lija #320 y se desengrasaron. Después de eso, el resultante se suspendió en un horno de aire atmosférico calentado a 950°C, y se mantuvo durante 300 horas. Después de la prueba, se midió la masa de la muestra para determinar una diferencia con respecto a la masa de la muestra antes de la prueba previamente medida, con lo que se calculó el aumento de peso por oxidación (g/m^2). Cada prueba se llevó a cabo dos veces, y la resistencia a la oxidación continua se evaluó en función del valor promedio de las pruebas.

Prueba de oxidación continua en atmósfera de vapor de agua

Se recortaron muestras (30 mm x 20 mm) de varias láminas recocidas laminadas en frío obtenidas como se describió anteriormente. Luego, se formó un orificio de 4 mmφ en la parte superior de cada muestra. La superficie frontal y la superficie final se pulieron con papel de lija #320 y se desengrasaron. La muestra se mantuvo durante 300 horas en un horno calentado a 950°C cuya atmósfera se transformó en una atmósfera de vapor de agua haciendo fluir gas burbujeante que contenía 7 % de volumen de CO_2, 1 % de volumen de O_2 y el resto de N_2 a 0.5 L/min en destilado agua mantenida a 60°C. Después de la prueba, se midió la masa de la muestra para determinar una diferencia con respecto a la masa de la muestra antes de la prueba previamente medida, con lo que se calculó el aumento de peso por oxidación (g/m^2). Cada prueba se llevó a cabo dos veces, y la resistencia a la oxidación continua se evaluó en función del valor promedio de las pruebas.

Ejemplo 2

El lingote de acero restante del lingote de acero de 50 kg reducido a la mitad en el Ejemplo 1 se calentó a 1170°C, y se laminó en caliente para formar una barra de lámina que tenía un espesor de 30 mm y una anchura de 150 mm. A continuación, la barra de lámina se forjó para formar una barra que tenía una sección transversal de 35 mm x 35 mm. La barra se recoció a una temperatura de 1030°C, y luego se mecanizó para formar una muestra de prueba de fatiga térmica que tenía una dimensión mostrada en la figura 1. Luego, la muestra de prueba se sometió a la siguiente prueba de fatiga térmica. Como ejemplos de referencia, de la misma manera que en el ejemplo 1, también con respecto a los aceros de las invenciones descritas en la WO 2003/004714 y en las publicaciones de solicitudes de patente japonesa no examinadas Nos. 2006-117985 y 2000-297355 y SUS444, se produjeron muestras en de la misma manera que arriba, y luego se somete a una prueba de fatiga térmica.

Prueba de fatiga térmica

En una prueba de fatiga térmica, se repitió la subida y la bajada de temperatura entre 100°C y 850°C a una relación de restricción de 0.35, y luego se midió la vida de fatiga térmica. Durante la prueba, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento se ajustaron a 10°C/seg, respectivamente, y el tiempo de mantenimiento a 100°C se ajustó a 2 min y el tiempo de mantenimiento a 850°C se ajustó a 5 min. La vida de fatiga térmica se determinó como el menor número de ciclos cuando un esfuerzo, que se calculó dividiendo una carga detectada a 100°C por la sección transversal de una porción de equilibrio térmico de la muestra de ensayo, comienza a disminuir continuamente en relación con el estrés de un ciclo anterior.

Los resultados de la prueba de oxidación continua en el aire y la prueba de oxidación continua en una atmósfera de vapor de agua del Ejemplo 1 y los resultados de la prueba de resistencia a la fatiga térmica del Ejemplo 2 se muestran colectivamente en la Tabla 2. Como se desprende de la Tabla 2, cada acero de los ejemplos que están de acuerdo con la invención tienen resistencia a la oxidación y resistencia a la fatiga térmica igual o superior a las de SUS444, y se logran los objetivos de la invención. Por el contrario, los aceros de ejemplos comparativos de ejemplos de referencia que están fuera del alcance de la invención no son excelentes en términos de resistencia a la oxidación y resistencia a la fatiga térmica, y por lo tanto no se logran los objetivos de la invención.

Aplicabilidad industrial

El acero de la invención se puede usar preferiblemente no solo como componente de escapes de automóviles o similares, sino también como componentes de escape de sistemas de energía eléctrica térmica o componentes ácidos sólidos para células de combustible que requieran propiedades similares.

Tabla 1-1

Acero No.	Componente químico (peso %)														Observaciones
	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Cu	Nb	Ti	Mo	W	N	Otros	
1	0.006	0.19	0.13	0.37	0.032	0.004	17.5	1.35	0.43	0.006	0.02	0.04	0.008	-	Ejemplo de la Invención
2	0.005	0.35	0.28	0.51	0.026	0.002	17.3	1.56	0.41	0.002	0.03	0.01	0.007	-	Ejemplo de la Invención
3	0.008	0.09	0.63	1.12	0.029	0.003	16.2	1.42	0.46	0.051	0.04	0.01	0.008	-	Ejemplo de la Invención
4	0.004	0.45	0.22	0.32	0.033	0.005	19.3	1.92	0.36	0.12	0.02	0.03	0.007	-	Ejemplo de la Invención
5	0.011	0.82	0.41	0.72	0.020	0.002	17.1	1.21	0.44	0.009	0.04	0.02	0.004	-	Ejemplo de la Invención
6	0.005	0.27	0.33	0.48	0.022	0.001	17.7	1.46	0.48	0.006	0.02	0.01	0.011	-	Ejemplo de la Invención
7	0.004	0.19	0.33	0.39	0.029	0.002	21.6	1.77	0.39	0.005	0.01	0.01	0.008	-	Ejemplo de la Invención
8	0.007	0.17	0.23	0.47	0.029	0.003	17.2	1.39	0.45	0.004	0.01	0.01	0.008	B/0.0009 V/0.051	Ejemplo de la Invención
9	0.006	0.41	0.09	0.66	0.033	0.001	18.2	1.61	0.40	0.09	0.05	0.01	0.009	REM/0.013 Ni/0.33	Ejemplo de la Invención
10	0.008	0.37	0.71	0.88	0.018	0.003	17.8	1.28	0.52	0.002	0.01	0.02	0.007	Co/0.04 Zr/0.06	Ejemplo de la Invención
11	0.006	0.31	0.35	0.14	0.030	0.002	17.1	1.46	0.44	0.006	0.01	0.02	0.009	-	Ejemplo comparativo

Acero No.	Componente químico (peso %)														Observaciones
	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Cu	Nb	Ti	Mo	W	N	Otros	
12	0.006	0.32	0.55	0.69	0.028	0.003	17.4	0.87	0.51	0.004	0.02	0.01	0.009	-	Ejemplo comparativo
13	0.007	0.23	0.25	0.47	0.027	0.002	17.6	1.18	0.44	0.003	0.06	0.02	0.008	V:0.18	Ejemplo de la Invención
14	0.003	0.09	0.12	0.46	0.025	0.003	17.5	1.26	0.42	0.008	0.05	0.03	0.007	V:0.22	Ejemplo de la Invención
15	0.008	0.15	0.39	0.51	0.021	0.001	17.3	1.38	0.48	0.024	0.02	0.06	0.008	V:0.29	Ejemplo de la Invención
16	0.006	0.32	0.34	0.46	0.024	0.002	17.7	1.22	0.46	0.005	0.06	0.02	0.005	V:0.38	Ejemplo de la Invención
17	0.009	0.18	0.15	0.49	0.027	0.004	17.4	1.48	0.47	0.014	0.04	0.03	0.006	V:0.44	Ejemplo de la Invención
18	0.007	0.27	0.15	0.53	0.027	0.003	19.1	1.28	0.45	0.004	0.05	0.02	0.007	V:0.20	Ejemplo de la Invención
19	0.005	0.03	0.11	0.51	0.024	0.002	18.2	1.19	0.45	0.006	0.05	0.03	0.006	V:0.23	Ejemplo de la Invención

Tabla 1-2

Acero No.	Componente químico (peso %)														Observaciones
	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Cu	Nb	Ti	Mo	W	N	Otros	
20	0.007	0.86	0.18	0.25	0.028	0.003	17.4	1.47	0.5	0.006	0.03	0.03	0.006	V:0.04	Ejemplo de la Invención
21	0.006	0.45	0.23	0.44	0.033	0.004	17	1.53	0.47	0.004	0.01	0.04	0.005	V:0.08	Ejemplo de la Invención
22	0.007	0.73	0.11	0.89	0.025	0.002	17.9	1.71	0.39	0.002	0.01	0.02	0.007	V:0.34	Ejemplo de la Invención
23	0.008	0.52	0.21	0.39	0.03	0.004	17.1	1.45	0.48	0.003	0.02	0.02	0.008	V:0.06	Ejemplo de la Invención
24	0.008	0.94	0.34	0.65	0.018	0.001	18.5	1.21	0.43	0.007	0.01	0.03	0.006	V:0.19	Ejemplo de la Invención
25	0.008	0.31	0.42	0.019	0.031	0.003	18.7	0.02	0.52	0.003	1.87	0.02	0.008	-	SUS444

Acero No.	Componente químico (peso %)														Observaciones
	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Cu	Nb	Ti	Mo	W	N	Otros	
26	0.008	0.32	0.05	0.01	0.028	0.002	17.02	1.93	0.33	0.002	0.01	0.02	0.010	Ni/0.10 V/0.10	Ejemplo de referencia 1
27	0.009	0.46	0.54	0.002	0.029	0.003	18.90	1.36	0.35	0.08	0.01	0.02	0.007	Ni/0.10 V/0.03 B/0.0030	Ejemplo de referencia 2
28	0.006	0.22	0.05	0.052	0.005	0.0052	18.8	1.65	0.42	0.09	0.02	0.02	0.006	Ni/0.15	Ejemplo de referencia 3

(Notas) Ejemplo de referencia 1: Acero No. 3 de la invención de WO 2003/004714

Ejemplo de referencia 2: Acero No. 7 de la invención de la publicación de solicitud de patente japonesa no examinada No. 2006-117985.

Ejemplo de referencia 3: Acero No. 5 de la invención de la publicación de solicitud de patente japonesa no examinada No. 2000-297355

Tabla 2

Acero No.	Ganancia de peso debida a la oxidación (g/m^2)	Vida de fatiga térmica (horas)	Oxidación por vapor de agua (g/m^2)	Observaciones
1	21	1230	82	Ejemplo de la Invención
2	20	1330	55	Ejemplo de la Invención
3	16	1270	>100	Ejemplo de la Invención
4	22	1500	49	Ejemplo de la Invención
5	18	1210	40	Ejemplo de la Invención
6	21	1300	66	Ejemplo de la Invención
7	21	1450	80	Ejemplo de la Invención

Acero No.	Ganancia de peso debida a la oxidación (g/m^2)	Vida de fatiga térmica (horas)	Oxidación por vapor de agua (g/m^2)	Observaciones
8	21	1260	85	Ejemplo de la Invención
9	18	1390	50	Ejemplo de la Invención
10	17	1210	53	Ejemplo de la Invención
11	80	1290	79	Ejemplo comparativo
12	14	820	58	Ejemplo comparativo
13	15	1200	71	Ejemplo de la Invención
14	15	1230	>100	Ejemplo de la Invención
15	14	1260	79	Ejemplo de la Invención
16	14	1210	57	Ejemplo de la Invención
17	14	1310	78	Ejemplo de la Invención
18	15	1240	56	Ejemplo de la Invención
19	15	1210	>100	Ejemplo de la Invención
20	25	1300	39	Ejemplo de la Invención
21	21	1350	48	Ejemplo de la Invención
22	13	1430	34	Ejemplo de la Invención
23	22	1280	41	Ejemplo de la Invención
24	12	1260	37	Ejemplo de la Invención

Acero No.	Ganancia de peso debida a la oxidación (g/m^2)	Vida de fatiga térmica (horas)	Oxidación por vapor de agua (g/m^2)	Observaciones
25	27	1120	51	SUS444
26	>100	1480	<u>>100</u>	Ejemplo de referencia 1
27	>100	1240	<u>>100</u>	Ejemplo de referencia 2
28	>100	1400	<u>>100</u>	Ejemplo de referencia 3

(Notas) Ejemplo de referencia 1: Acero No. 3 de la invención de WO 2003/004714

Ejemplo de referencia 2: Acero No. 7 de la invención de la publicación de solicitud de patente japonesa no examinada No. 2006-117985.

Ejemplo de referencia 3: Acero No. 5 de la invención de la publicación de solicitud de patente japonesa no examinada No. 2000-297355

REIVINDICACIONES

1. Un acero inoxidable ferrítico, que consiste en:

C: 0.002 a 0.015 % en peso,

Si: 1.0 % en peso o menos,

Mn: 0.05 % en peso a 1.0 % en peso,

P: 0.04 % en peso o menos,

S: 0.010 % en peso o menos,

Cr: 16 a 23 % en peso,

N: 0.015 % en peso o menos,

Nb: 0.3 a 0.65 % en peso,

Ti: 0.15 % en peso o menos,

Mo: 0.1 % en peso o menos,

W: 0.1 % en peso o menos,

Cu: 1.0 a 2.5 % en peso,

Al: 0.2 a 1.5 % en peso, y

un equilibrio de Fe e impurezas inevitables,

así como opcionalmente uno o dos o más elementos seleccionados de

B: 0.003 % en peso o menos,

REM: 0.08 % en peso o menos,

Zr: 0.5 % en peso o menos,

V: 0.5 % en peso o menos,

Co: 0.5 % en peso o menos, y

Ni: 0.5 % en peso o menos.

2. El acero inoxidable ferrítico de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el Si está en el intervalo de 0.4 a 1.0 % en peso.

3. El acero inoxidable ferrítico de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el Si está en el intervalo de 0.4 a 1.0 % en peso y el Ti está en el intervalo de 0.01 % en peso o menos.

FIG. 1

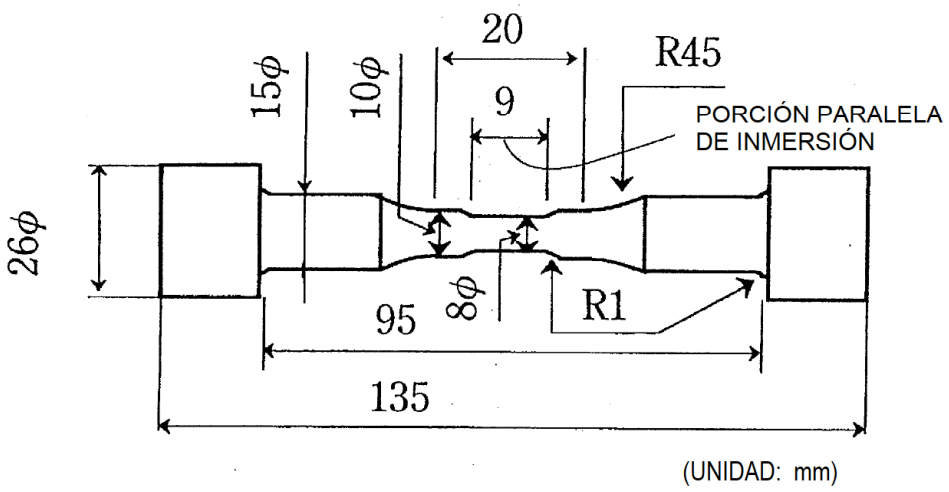

20
R45
15φ
10φ
9
PORCIÓN PARALELA
DE INMERSIÓN
26φ
8φ
R1
95
135
(UNIDAD: mm)

FIG. 2

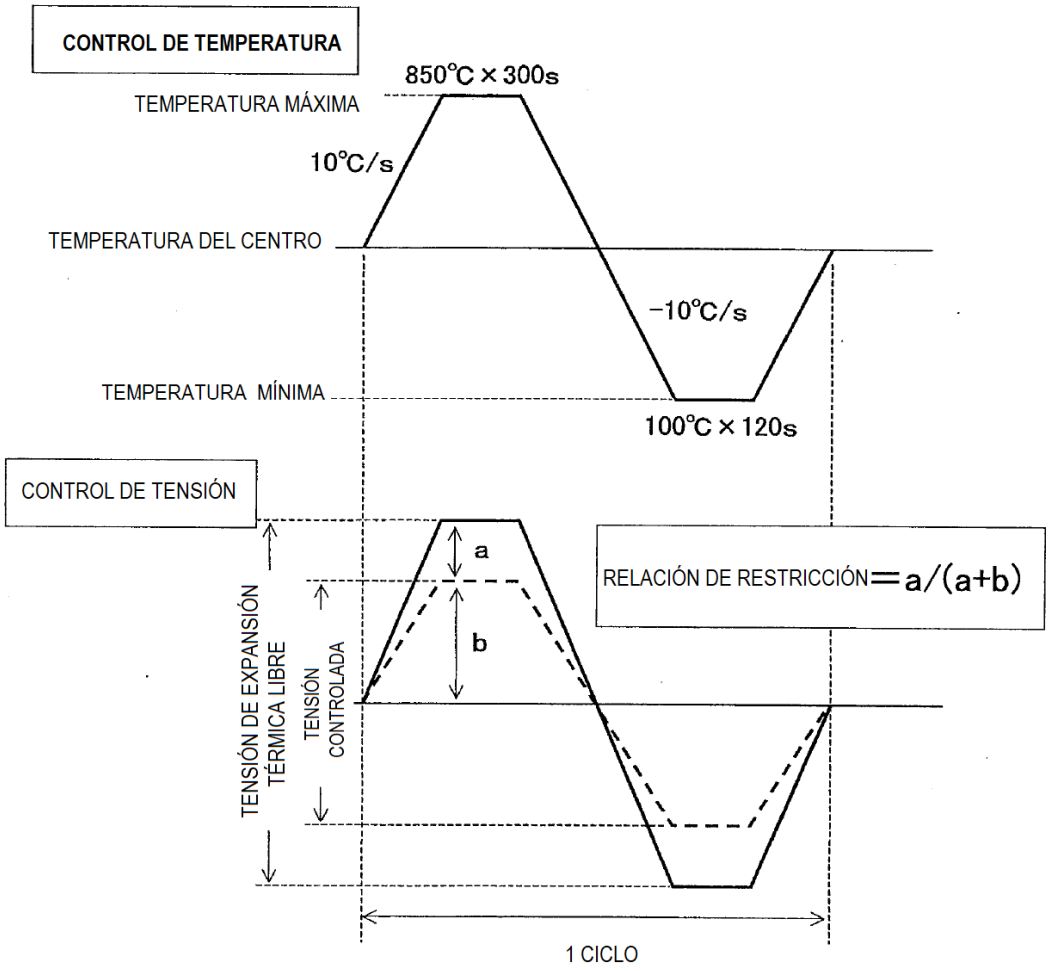

CONTROL DE TEMPERATURA
850°C × 300s
TEMPERATURA MÁXIMA
10°C/s
TEMPERATURA DEL CENTRO
−10°C/s
TEMPERATURA MÍNIMA
100°C × 120s
CONTROL DE TENSIÓN
a
b
RELACIÓN DE RESTRICCIÓN=a/(a+b)
TENSIÓN DE EXPANSIÓN TÉRMICA LIBRE
TENSIÓN CONTROLADA
1 CICLO

FIG. 3

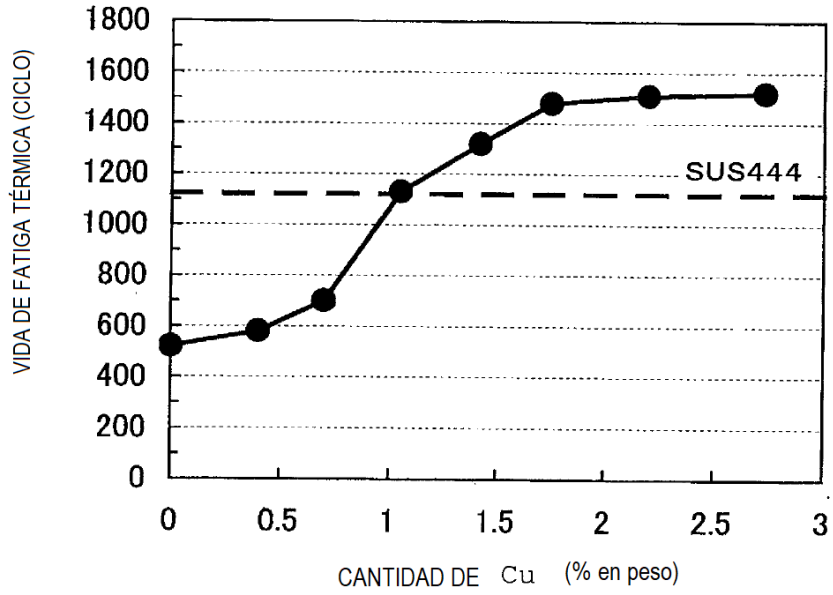

1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
VIDA DE FATIGA TÉRMICA (CICLO)
SUS444
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
CANTIDAD DE Cu (% en peso)

FIG. 4

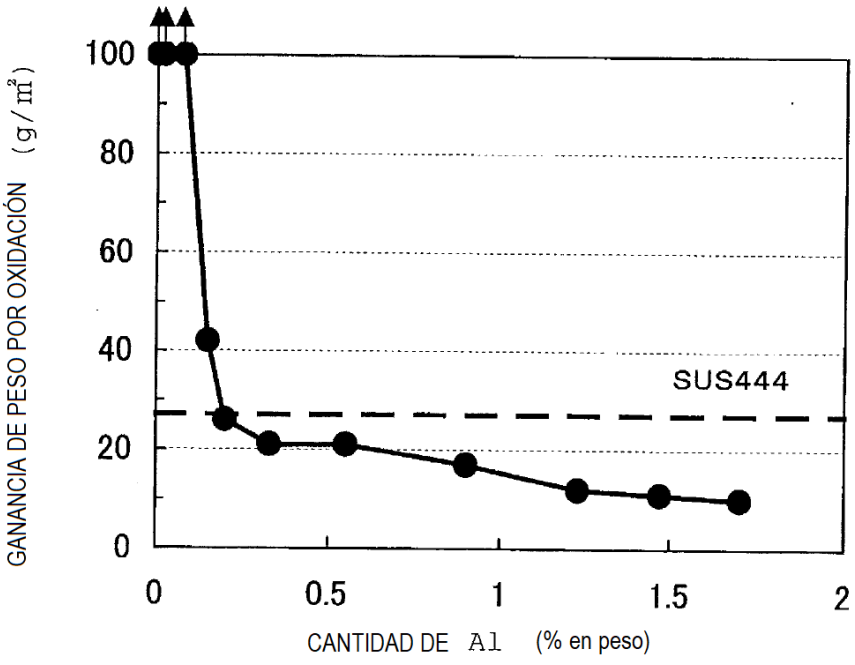
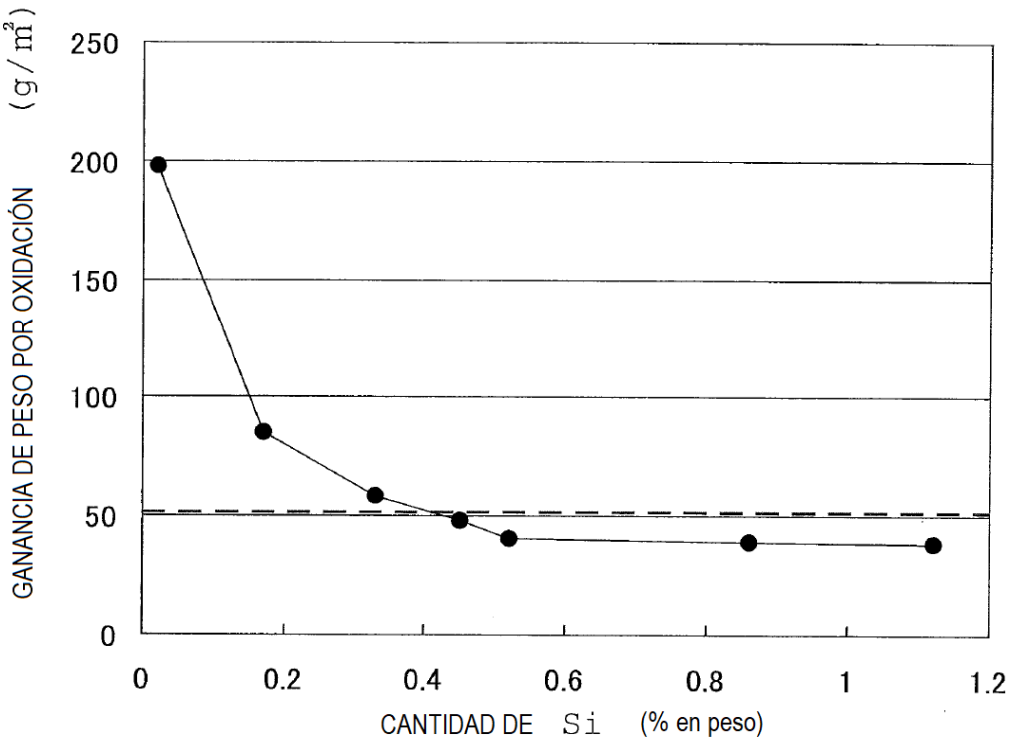

100
80
60
40
20
0
GANANCIA DE PESO POR OXIDACIÓN (g/m²)
SUS444
0
0.5
1
1.5
2
CANTIDAD DE Al (% en peso)

FIG. 5


GANANCIA DE PESO POR OXIDACIÓN (g/m²)
250
200
150
100
50
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
CANTIDAD DE Si (% en peso)