(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 664 812**

(51) Int. CI.:

C22C 38/18	(2006.01)
B24C 1/10	(2006.01)
C21D 7/06	(2006.01)
C21D 9/02	(2006.01)
F16F 1/06	(2006.01)
C21D 8/06	(2006.01)
C21D 1/18	(2006.01)
C22C 38/04	(2006.01)
C22C 38/02	(2006.01)
F16F 1/02	(2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.08.2011 PCT/JP2011/068335**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **09.02.2012 WO12018144**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.08.2011 E 11814765 (1)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.01.2018 EP 2602350**

(54) Título: **Muelle y método de fabricación del mismo**

(30) Prioridad:

22.11.2010 JP 2010260615
04.08.2010 JP 2010175593

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.04.2018

(73) Titular/es:

NHK SPRING CO., LTD. (100.0%)
10, Fukuura 3-chome, Kanazawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 236-0004, JP

(72) Inventor/es:

SUZUKI, TAKESHI;
ONO, YOSHIKI;
KUROKAWA, SHIMPEI y
SHIBAIRI, KOSUKE

(74) Agente/Representante:

AZNÁREZ URBIETA, Pablo

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

Muelle y método de fabricación del mismo

Campo técnico

La presente invención se refiere a un muelle con una resistencia superior a la fatiga y una resistencia superior a la flexión elástica, así como a un método de fabricación del mismo.

Estado de la técnica

Los materiales de los muelles de válvula para motores de automóvil pueden incluir, por ejemplo, alambres de acero al carbono templado en aceite (SWO-V) o alambres de acero de cromo-vanadio templado (SWOCV-V) y alambres de acero al cromo-silicio templados en aceite (SWOSC-V), especificados en los *Japanese Industrial Standards* (JIS). Estos alambres de acero de cromo-silicio templados en aceite son amplia y convencionalmente empleados a la vista de la resistencia a la fatiga y la resistencia a la flexión elástica. En los últimos años se pretende reducir en gran medida el peso del muelle de válvula con el fin de mejorar la eficacia del combustible en los automóviles, existiendo una tendencia a aumentar la resistencia a la tracción del alambre para muelles con el fin de aumentar la tensión de diseño de los muelles de válvula. En el caso de un alambre para muelles con una estructura metálica de martensita templada, como un alambre templado en aceite especificado en los JIS, la sensibilidad en la entalladura a grietas y defectos, tales como inclusiones, aumenta en gran medida a medida que aumenta la resistencia del alambre para muelles. Por tanto, es más probable que un alambre para muelles de este tipo se rompa durante el conformado en frío (enrollamiento) y que se produzca una fractura por fragilidad durante el uso.

En un muelle helicoidal, después del enrollamiento, se genera un esfuerzo de tracción residual en la dirección de aplicación de una fuerza externa de compresión durante el enrollamiento, generándose una tensión residual de compresión en la dirección en que se aplica un esfuerzo de tracción externo durante el enrollamiento. Por esta razón, un alambre para muelles con una mayor resistencia a la tracción tiende a mayores valores de las tensiones residuales. Además, cuando se deforma el muelle helicoidal por compresión, se aplica un esfuerzo de tracción mayor sobre una superficie en un lado del diámetro interior del muelle helicoidal. Por tanto, cuando se comprime un muelle helicoidal formado en frío se aplica un esfuerzo de tracción grande sobre el lado interior del diámetro del muelle helicoidal, además de la tensión de tracción residual que se genera después de su enrollamiento. Así, es probable que el lado interior del diámetro del muelle helicoidal constituya un punto inicial de fallo por fatiga.

A este respecto, es necesario mantener la resistencia a la fatiga del muelle helicoidal incluso cuando se aplica un esfuerzo de tracción grande. Para tener en cuenta esto, en una capa superficial de un alambre para muelles se puede proporcionar una resistencia residual a la compresión desde la superficie hasta profundidad del alambre para muelles. Por ejemplo, se utiliza ampliamente el método de granallado para conseguir una resistencia residual a la compresión en una capa superficial de un alambre para muelles con el fin de mejorar la resistencia del muelle a la fatiga.

Sin embargo, debido a que en los últimos años se ha aumentado el límite elástico de acuerdo con el aumento de la dureza de un alambre para muelles, se reduce la posibilidad de deformación plástica por chorreado con granalla y resulta difícil formar una capa de gran espesor con una tensión compresiva residual. El espesor de la capa de tensión compresiva residual es igual a la distancia desde la superficie hasta una punto en el que la tensión compresiva residual es igual a cero, que se denomina en lo que sigue “espesor“.

Mediante el aumento de la resistencia compresiva residual en la capa extrema exterior por chorreado con granalla, se puede prevenir la aparición temprana de roturas en la superficie. Por otro lado, de acuerdo con el aumento de la tensión de diseño en los últimos años, la tensión combinada de tensión aplicada y tensión residual (tensión neta aplicada en el lado interior de un alambre para muelles) alcanza una profundidad máxima alrededor de 200 a 600 µm desde la superficie. Esta profundidad desde la superficie en dirección radial depende del diámetro del alambre para muelles, del grado de tensión aplicada y similares. Si existen inclusiones con tamaños de aproximadamente 20 µm en esta zona, la tensión se concentra en estas inclusiones. La tensión concentrada puede sobrepasar la resistencia a la fatiga del alambre para muelles y puede hacer que las inclusiones constituyan puntos de partida para una rotura. Así, se describen las siguientes técnicas para resolver estos problemas.

En la solitidud de patente japonesa abierta sin examinar No. 64-83644 se describe un muelle con una alta resistencia a la fatiga. Este muelle se obtiene empleando un alambre laminado templado en aceite al que se añade un elemento tal como, por ejemplo, V en la composición química del acero, que se especifica en los JIS. El elemento adicional aumenta la resistencia del material de acero por refinamiento de los granos cristalinos y mejora así la resistencia a la fatiga. Sin embargo, con ello aumenta el coste del material.

En la solicitud de patente japonesa sin examinar abierta No. 2008-163423 se describe un muelle realizado con un alambre de acero muerto al silicio con características superiores de fatiga. Este muelle se obtiene por enrollamiento del material de acero, en el que se han añadido cantidades de Ba, Al, Si, Mg y Ca. Para añadir estos elementos en cantidades equilibradas, el proceso de refinado del acero es muy difícil controlar, por lo que el coste de producción resulta muy alto.

En la solicitud de patente japonesa sin examinar abierta No. 2005-120479 se describe un muelle con una alta resistencia a la fatiga. En este muelle se ajusta la composición química del acero y se reduce el tamaño de grano a la vez que se reduce el tamaño de las inclusiones, ya que las inclusiones pueden llegar a ser el punto de inicio de fallos por fatiga. En estos muelles aumenta la resistencia a la fatiga, pero el grado de resistencia a la fatiga (esfuerzo cortante máximo τmáx. = aproximadamente 1.200 MPa) es inferior al esfuerzo real (τmáx = aproximadamente 1.300 a 1.400 MPa). Se requiere un esfuerzo real para los muelles de válvula ligeros y de alta resistencia de los últimos años.

Además, en la solicitud de patente japonesa sin examinar abierta No. 2005-120479 se describe un método para realizar un tratamiento de nituración con el fin de conseguir una mayor resistencia a la fatiga. El tratamiento de nituración puede aumentar la dureza superficial, por lo que puede mejorar la resistencia a la fatiga. En este método se forman nitruros de hierro en una capa de la superficie y deben ser eliminados por completo despúes del tratamiento de nituración, ya que los nitruros de hierro pueden provocar una disminución de la resistencia a la fatiga. Por ello, el proceso de producción es complicado y el coste del tratamiento de nituración es alto, conllevando un alto coste de producción.

En la patente japonesa No. 4330306 se describe un muelle hecho de un alambre estirado duro y con una alta resistencia a la fatiga. El alambre estirado duro es un alambre laminado duro con una estructura de perlita o una estructura mixta de ferrita y perlita. El muelle se forma por enrollamiento del alambre estirado duro y despúes se controla la diferencia de tensión residual entre el lado interior del diámetro y el lado exterior del diámetro del muelle para que no supere 500 MPa. De acuerdo con la técnica descrita en la patente japonesa No. 4330306, no son necesarios tratamientos de enfriamiento rápido y desactivación, ya que estos tratamientos generalmente se utilizan en gran medida para producir alambres templados en aceite, reduciéndose correspondientemente el coste. En esta técnica debe ajustarse la composición química del acero con el fin de controlar que la diferencia de tensión residual no supere 500 MPa y el acero debe recocerse a como mínimo 400ºC después de su enrollamiento. Así, se reduce la resistencia del acero y, por tanto, es difícil conseguir un muelle altamente resistente que cumpla los requisitos recientes.

En la solicitud de patente japonesa abierta sin examinar No. 2-57637 se describe un alambre de acero para muelles con una capacidad superior para el conformado en frío y una alta resistencia a la fatiga. Este alambre de acero para muelles se obtiene por la adición de Mo, V y similares a la composición química de un acero para muelles especificado en los JIS y por tratamiento de temple bainítico. La proporción elástica (proporción entre el límite elástico y resistencia a la tracción) se ajusta en esta técnica para que no supere 0,85 con el fin de reducir la resistencia residual a la tracción que puede permanecer en el lado interior del diámetro de un muelle helicoidal después de conformar en frío el alambre de acero para muelles. Sin embargo, incluso si se enrolla en frío, para un alambre para muelles con una proporción elástica no superior a 0,85 y una vez recocido, es difícil reducir lo suficiente la resistencia a la tracción residual que se genera después del enrollamiento en frío desde la superficie hasta el interior. Por ello, incluso si se realiza a continuación un chorreado de granalla, es difícil conseguir una tensión residual de compresión desde la superficie hasta la profundidad interna, por lo que queda limitado el desarrollo en cuanto a la resistencia a la fatiga. Además, no se describen en la solicitud de patente japonesa abierta sin examinar No. 2-57637 los tipos y las constantes de las estructuras del alambre de acero para muelles.

Por otro lado, recientemente cada vez está creciendo más la importancia del mejorar la resistencia a la flexión elástica de los muelles de válvula de acuerdo con el incremento de la tensión de diseño. Si la resistencia a la flexión elástica es baja, la magnitud de la flexión elástica de un muelle aumenta cuando se aplica un alto esfuerzo, no aumentando la velocidad de la máquina según lo previsto y resultando la reacción de la máquina inferior.

Se han propuesto diferentes técnicas para mejorar la resistencia a la flexión elástica. En la solicitud de patente japonesa abierta sin examinar No. 2004-315967 se describe una técnica para mejorar la resistencia a la fatiga y a la flexión elástica. Según esta técnica se aumentan la concentración principalmente de Cr y Si en una

composición de un acero para muelles especificada en las JIS, mejorando la posibilidad de enfriamiento rápido y la resistencia al suavizado térmico. De acuerdo con esta técnica se mejora en cierta medida la resistencia a la flexión elástica, pero el coste material aumenta por la alta aleación.

En la solicitud de patente japonesa abierta sin examinar No. 2007-302950 se describe una técnica para mejorar la resistencia a la flexión elástica. La concentración principalmente de Cr se incrementa según esta técnica y se añade V en una composición de un acero para muelles especificado en los JIS. Además se especifican el tamaño, la densidad por área y la composición de cementita para obtener un efecto de refuerzo de la precipitación de la cementita fina y para prevenir la descomposición de la cementita durante el recocido a baja temperatura y la nituración. Según esta técnica, aumenta el coste del material por alta aleación y las condiciones del enfriamiento rápido y desactivación deben controlarse estrictamente para obtener la estructura predeterminada de cementita. Por tanto aumenta el coste de producción.

En la solicitud de patente japonesa abierta sin examinar No. 7-179936 se describe otra técnica para mejorar la resistencia a la flexión elástica. Según esta técnica, se añade principalmente V y N en una composición de acero para muelles especificado en los JIS. Además se realizan tratamientos de temple bainítico y templado subsiguiente, obteniendose una estructura templada de bainita. La resistencia del acero para muelles obtenida según esta técnica es baja y la resistencia a la flexión elástica es insuficiente. Además, el coste del material aumenta por la alta aleación y el proceso resulta complicado, aumentando el coste de producción.

Bibliografía de patente US 2007/125456
Bibliografía de patente JP H03 215623

Descripción de la invención

La presente invención pretende solucionar los problemas de las técnicas convencionales, siendo un objeto de la presente invención proporcionar un muelle con una mayor resistencia a la fatiga y un método de producción del mismo. El muelle se produce con reducción del coste de material en un proceso simplificado.

Además, la presente invención pretende resolver los problemas de las técnicas convencionales y otro objeto de la presente invención es proporcionar un muelle con una mayor resistencia a la flexión elástica y un método de producción del mismo. El muelle se produce con reducción del coste de material en un proceso simplificado.

Los inventores de la presente invención llevaron a cabo investigaciones intensivas en cuanto a la resistencia a la fatiga de un muelle de válvula con una gran resistencia. Los inventores de la presente invención obtuvieron como resultado la siguiente idea. Esto es, mediante el ajuste de la composición del acero para muelles y en condiciones de recocido después del enrollamiento, se puede reducir en cierta medida el esfuerzo residual generado durante el enrollamiento. Sin embargo, de acuerdo con este método es difícil eliminar por completo el efecto del esfuerzo residual con relación a la resistencia a la fatiga mientras se mantiene la alta resistencia del acero para muelles. Por el contrario, es efectivo calentar el alambre para muelles hasta una temperatura de austenitización de manera que el esfuerzo residual generado por el enrollamiento es esencialmente igual a cero después del enrollamiento. Por otro lado, los inventores de la presente invención descubrieron lo siguiente. Esto es, por tratamiento consecutivo de austenitización bajo condiciones predeterminadas con relación al alambre para muelles que se calienta hasta temperatura de austenitización, se obtiene una estructura donde la resistencia, la ductilidad y la dureza están equilibradas. El resultado es que se mejora la resistencia a la fatiga del alambre para muelles. Además, mediante un granallado se transforma la austenita residual en la capa superficial del alambre para muelles en martensita, mediante una transformación inducida por deformación. Debido a que se produce una expansión del volumen durante esta transformación, se obtiene un gran esfuerzo residual de compresión desde la superficie profundamente hasta el interior, con lo que se previene la aparición de fisuras por fatiga y se mejora la resistencia a la fatiga.

Los inventores de la presente invención descubrieron también lo siguiente. Esto es, un muelle helicoidal con el que se obtiene un gran esfuerzo residual de compresión desde la superficie profundamente hasta el interior puede fabricarse con un material tan económico como un alambre templado al aceite especificado en los JIS, un alambre duro trefilado con la misma composición que la del alambre templado al aceite o similar. Además, el muelle helicoidal se produce mediante granallado normal en un paso posterior, sin un paso de tratamiento térmico complicado especial, siempre que se elija un historial de desarrollo térmico apropiado para conformar una estructura predeterminada y se ajusten las concentraciones predeterminadas de los elementos de la aleación. Por otro lado, el muelle helicoidal tiene una gran resistencia a la fatiga, correspondiente a los requisitos del mercado, incluso si no se realiza un tratamiento de nitruración, aunque éste selleva a cabo usualmente. En consecuencia, se reduce el coste del procesamiento y se simplifica el proceso.

La presente invención proporciona un primer muelle realizado en base a los descubrimientos arriba explicados, y el muelle consiste, en% en masa, en 0,5 a 0,7% de C, 1,0 a 2,0% de Si, 0,1 a 1,0% de Mn, 0,1 a 1,0% de Cr,

como máximo 0,035% de P, como máximo 0,035% de S y el resto Fe e impurezas inevitables. El muelle tiene una estructura que incluye como máximo un 65% de bainita y un 4 a 13% de austenita residual por relación de área en sección transversal, y la austenita residual contiene carbono en una concentración media del 0,65 al 1,7%. El muelle tiene una capa de esfuerzo residual de compresión en sección transversal desde la superficie hasta una profundidad de 0,35 mm a D/4, siendo D (mm) un diámetro de la sección transversal circular equivalente. La capa de esfuerzo residual de compresión tiene un esfuerzo máximo residual de compresión de 800 a 2.000 MPa. El muelle tiene una parte central con una dureza de 550 a 650 HV en sección transversal y tiene una capa de gran dureza que es mayor que la parte central en 50 a 500 HV desde la superficie hasta una profundidad de 0,05 a 0,3 mm.

La presente invención proporciona un primer método de producción de un muelle, incluyendo el método un paso de preparar una varilla de alambre, un paso de conformar la varilla hasta obtener una forma de muelle, un paso de tratamiento térmico y un paso de granallado de la varilla de alambre después del paso de tratamiento térmico. El La vcarilla de alambre se compone, en% en masa, del 0,5 a 0,7% de C, del 1,0 al 2,0% de Si, del 0,1 al 1,0% de Mn, del 0,1 al 1,0% de Cr, como máximo del 0,035% de P, como máximo del 0,035% de S y el resto de Fe e impurezas inevitables. La varilla de alambre se austenitiza durante el paso de tratamiento térmico a una temperatura entre el punto de Ac3 a (punto Ac3 + 250ºC) y se enfría con una velocidad de enfriamiento no inferior a 20ºC/segundo. A continuación, la varilla de alambre se mantiene a una temperatura entre el punto Ms y (punto Ms + 60ºC) durante como mínimo 400 segundos y se enfría a temperatura ambiente a una velocidad de enfriamiento no inferior a 20ºC/segundo.

El punto Ac3 es una temperatura límite a la que una estructura se transforma durante el calentamiento desde una región bifásica de ferrita y austenita a una región monofásica de austenita. El punto Ms es la temperatura a la que se inicia la generación de martensita durante el enfriamiento. En la presente invención “la parte central“ es una parte central de un círculo o una sección transversal circular o un centro de gravedad de un perfil con una sección transversal que no es la sección transversal circular, por ejemplo un perfil rectangular, elíptico o similar.

Además, los inventores de la presente invención realizaron una intensiva investigación sobre la resistencia a la flexión elástica de un muelle helicoidal bajo condiciones de alrededor de 120ºC. La flexión elástica de un muelle diseñado para resistir un alto esfuerzo cortante máximo de aproximadamente 1.400 MPa se ve perjudicada fundamentalmente por deslizamientos de dislocación. La magnitud de la flexión elástica es por tanto menor cuando se aplica una tensión neta más baja a un alambre para muelles. La tensión neta es una tensión combinada de la tensión remanente en el alambre para muelles cuando se aplica una carga y la tensión que se aplica sobre el alambre para muelles cuando se aplica una carga. Es decir, el esfuerzo residual de tracción que se genera por la tensión que queda después del enrollamiento en frío afecta adversamente a la resistencia a la flexión elástica y, por tanto, preferentemente se mantiene reducido. El esfuerzo residual de tracción que se genera después del enrollamiento en frío puede disminuir mediante recocido y se reduce a medida que aumenta la temperatura de recocido. Sin embargo, el material se ablanda correspondientemente y existe un límite para el incremento de la resistencia para reducir el ablandamiento mediante el ajuste de la composición. Así, es difícil eliminar esencialmente por completo el esfuerzo residual de tracción mientras se mantiene la alta resistencia del acero del muelle por recodido. Así, los inventores de la presente invención llegaron a la siguiente conclusión. Esto es, el calentamiento hasta una temperatura de austenitización de un alambre de muelle enrollado resulta efectivo para eliminar esencialmente por completo el esfuerzo residual que se genera por el enrollamiento y después mejorar la estructura del muelle enrollado.

Con el fin de prevenir la flexión elástica mientras se mantiene la alta resistencia del acero para muelles, resulta efectivo prevenir el movimiento de dislocaciones móviles. En cuanto a este método, en general se utiliza ampliamente el envejecimiento por deformación, que se produce aplicando una deformación y un recocido a baja temperatura. En el envejecimiento por deformación se incrementa primero la densidad de dislocación aplicando una deformación, con lo que algunas dislocaciones se cruzan con o cortan dislocaciones de "bosque" (*forest dislocations*) o entran en las mismas y generan muescas y dobladuras. Algunas de las muescas y dobladuras se inmovilizan e impiden el movimiento de dislocaciones móviles subsiguientes. En este caso, aumentan en cierta medida las dislocaciones móviles. Por tanto, se realiza a continuación un calentamiento (envejecimiento), de modo que se acumulan los átomos disueltos en la fase sólida como el carbono que rodean las dislocaciones móviles, con lo que se previene el movimiento de las dislocaciones. Si la densidad de la dislocación móvil es demasiado alta, se reduce la cantidad de átomos disueltos en fase sólida acumulados por longitud de dislocación y se reducen los efectos del envejecimiento por deformación. La densidad de dislocación móvil debe controlarse correspondientemente de modo preliminar antes de realizar el envejecimiento.

Por otro lado, un alambre convencional templado al aceite tiene una estructura metálica donde se templa la martensita, con una estructura mixta de ferrita con concentraciones de carbono bajas y cementita (Fe_3C) debido a la temperatura de templado (llamada a continuación “estructura de martensita templada“). Puede haber casos

en que la austenita de una fase de alta temperatura permanezca en la estructura. Por ello se utilizan principalmente átomos de carbono para formar la cementita y la densidad de la dislocación móvil con relación a los átomos disueltos en fase sólida en la ferrita es alta, por lo que es difícil mejorar la resistencia a la flexión elástica con el envejecimiento por deformación. Incluso si se proporciona la deformación con el fin de aumentar el efecto de retención de las muescas y similares, debido a que la ductilidad de la estructura es reducida, se generan fácilmente defectos, como grietas microscópicas, que pueden afectar negativamente a la resistencia a la fatiga. Los inventores de la presente invención llegaron, por tanto, a la conclusión de que es difícil mejorar todavía más la resistencia a la flexión elástica mediante la aplicación del envejecimiento por deformación mientras se utiliza la estructura templada de martensita.

En vista de estas circunstancias, los inventores de la presente invención realizaron investigaciones intensivas y descubrieron lo siguiente. Esto es, por la formación de una estructura constituida sobre todo de bainita fina con una ductilidad superior depués del enrollamiento, se proporciona una deformación plástica mayor sin reducir la resistencia a la fatiga en comparación con un caso en que se utiliza una estructura de martensita templada convencional. En este caso se reduce la densidad de dislocación móvil, que afecta negativamente a la resistencia a la flexión elástica, por lo que se pueden fijar firmemente y de modo eficiente las dislocaciones móviles por el envejecimiento por deformación. Además, proporcionando una gran cantidad de deformación plástica en un paso de compresión, se genera una tensión residual de compresión al interior del alambre para muelles y se mejora la resistencia a la flexión elástica y la resistencia a la fatiga. El paso de compresión se describirá más adelante.

Además, los inventores de la presente invención se enfocaron en el endurecimiento por dispersión de una segunda fase en una estructura metálica y descubrieron lo siguiente. Esto es, mejora la resistencia a la flexión elástica por dispersión de austenita residual fina con una alta concentración de carbono en la estructura constituida sobre todo por bainita fina, con alta densidad. La austenita residual previene en este caso el movimiento de las dislocaciones. En general, debido a que la austenita que permanece en la estructura de martensita templada contiene carbono en concentraciones aproximadamente iguales a una concentración media de carbono de una fase básica, la austenita residual tiene una baja resistencia y se supone, por ello, que afecta negativamente a la resistencia a la flexión elástica.

A este respecto los inventores de la presente invención descrubrieron lo siguiente. Esto es, mediante el ajuste de una alta concentración de carbono en la austenita residual de modo que ésta sea superior a una concentración media de carbono en una fase básica, se mejora la resistencia de la austenita residual. Por tanto, esta austenita residual no influye de modo desventajoso en la resistencia a la flexión elástica. Por el contrario, la austenita residual es efectiva para mejorar la resistencia a la flexión elástica y la resistencia a la fatiga. Esto se debe a que los efectos de la transformación martensítica inducida por la deformación (acompañada por una gran expansión de volumen) se obtienen por la austenita residual con altas concentraciones de carbono al deformarse plásticamente la superficie por chorros de granalla. Consecuentemente, la tensión residual de compresión en la capa superficial del alambre para muelles se incrementa más si se compara con un caso convencional. En especial, se obtienen los efectos de la eliminación completa de la resistencia residual a la tracción que permanece después del enrollamiento en frío mediante el calentamiento de austenitización y los efectos de la transformación inducida por la deformación de la austenita residual. Por tanto, se forma una capa de tensión residual de compresión en una capa superficial de una superficie hasta una profundidad interior mediante chorros de granalla en un paso posterior. En este caso se forma la estructura de bainita fina con una mayor ductilidad en la totalidad del material de acero y aumenta la proporción inmovilizada de dislocaciones móviles mediante el envejecimiento por deformación. Además, la austenita residual fina con una alta resistencia se dispersa desde la capa superficial hacia el interior, mejorando el efecto de las dislocaciones fijas. Correspondientemente, se compensan la resistencia a la fatiga y la resistencia a la flexión elástica, que son superiores a los de un alambre templado en aceite.

Los inventores de la presente invención descubrieron también lo siguiente. Esto es, se puede fabricar un muelle helicoidal con un material barato, como es un alambre templado en aceite especificado en los JIS, un alambre trefilado duro con la misma composición que la del alambre templado en aceite o similar. Además, el muelle helicoidal se produce mediante la aplicación de un chorreado de granalla usual y compresión en pasos posteriores, sin un paso de tratamiento térmico especial complicado, siempre que se elija un estado apropiado del desarrollo térmico para formar una estructura predeterminada y se ajusten las concentraciones predeterminadas de los elementos de la aleación. Por otra parte, el muelle helicoidal tiene una alta resistencia a la flexión elástica, correspondiente a los requisitos del mercado, incluso si no se realiza un tratamiento de nitruración, aunque normalmente de aplica dicho tratamiento. En consecuencia se reduce el coste del proceso y éste se simplifica.

Así, la presente invención proporciona también un segundo muelle en el que la austenita residual tiene un diámetro de grano medio equivalente en círculo máximo de 3 μm en el primer muelle.

La presente invención proporciona además un segundo método de producción para un muelle y este método incluye un paso de preparar una varilla de alambre, un paso de conformar la varilla de alambre en un muelle, un paso de tratamiento térmico y un paso de granallado proyectando un chorro de granalla sobre la varilla de alambre después del paso de tratamiento témico. La varilla de alambre se compone, en% en masa, del 0,5 al 0,7% de C, del 1,0 al 2,0% de Si, del 0,1 al 1,0% de Mn, del 0,1 al 1,0% de Cr, como máximo un 0,035% de P, como máximo un 0,035% de S y el resto de Fe e impurezas inevitables. En el paso de tratamiento térmico se austenitiza la varilla de alambre a una temperatura entre el punto Ac3 y (punto Ac3 + 250ºC) y se enfría a una velocidad de enfriamiento mínima de 20ºC/segundo. A continuación, se mantiene la varilla de alambre a una temperatura de (punto Ms – 20ºC) a (punto MS + 60ºC) durante como mínimo 400 segundos y se enfría a temperatura ambiente.

Efectos de la invención

De acuerdo con el primer muelle de la presente invención, se obtiene un muelle con una resistencia superior a la fatiga sin tener que realizar un tratamiento térmico complicado y un tratamiento de endurecimiento de la superficie utilizando un alambre para muelles fácilmente disponible. El alambre para muelles no contiene elementos de aleación caros y tiene la composición de un acero para muelles especificado en los JIS. El muelle tiene una capa de gran dureza y una capa de gran espesor de tensión residual de alta compresión en una capa superficial. La posibilidad de reciclaje del muelle de la presente invención es alta, ya que la cantidad de los elementos de la aleación es pequeña. Además, de acuerdo con el muelle de la presente invención, el proceso de producción es simple y el tiempo de procesamiento se reduce, mejorando la productividad y ahorrando energía.

De acuerdo con el segundo muelle de la presente invención, se obtiene un muelle con una resistencia a la flexión elástica superior sin tener que realizar un tratamiento térmico complicado y un tratamiento de endurecimiento de la superficie, empleando un alambre para muelles que se encuentra fácilmente. El alambre para muelles no contiene ningún elemento de aleación caro y tiene la composición de un acero para muelles especificada en los JIS. El muelle tiene una zona de gran dureza y una capa gruesa de gran tensión residual de compresión en una capa superficial. La posibilidad de reciclaje del muelle de la presente invención es superior, debido a que la cantidad de los elementos de la aleación es pequeña. Además, de acuerdo con el muelle de la presente invención, el proceso de producción es simple y se reduce el tiempo de procesamiento, mejorando la productividad y ahorrando energía.

Breve descripción de las figuras

La figura 1A muestra el resultado de la observación de una imágen electrónica de reflexión *(SEM (Scanning Electron Microscopy)*) [microscopia electrónica de escaneo] de una estructura de un ejemplo práctico de la presente invención. La figura 1B muestra el resultado de la medida del mapa del elemento de carbono *(FE-EPMA (Field Emission Electron Probe Micro Analyzer)*). La figura 1 C muestra el resultado de la medida de un mapa de la estructura cristalina (fase) *(EBSD (Electron Backscatter Diffraction))*. La figura 1D es un gráfico que muestra el resultado de un análisis de la concentración de carbono en el eje I-II de la figura 1B.

Mejor forma de realización de la invención

1. Primera realización

Se describen las razones para limitar la composición química de un acero utilizado en la primera realización de la presente invención. El símbolo “%“ representa el “porcentaje en masa“ en la siguiente descripción.

C: 0,5 a 0,7%

El C es importante para conseguir una alta resistencia de como mínimo 1.800 MPa y una proporción determinada de austenita a temperatura ambiente. Para conseguir estos efectos es necesario añadir C en como mínimo un 0,5%. Por otro lado, si la concentración de C es excesiva, aumenta excesivamente la proporción de austenita residual que constituye una fase blanda, con lo que es difícil obtener la resistencia predeterminada. Así, la cantidad de C se ajusta en como máximo un 0,7%.

Si: 1,0 a 2,0%

El Si evita la generación de carburos a partir de la matriz austenítica cuando el C migra a la austenita desde la ferrita bainítica que forma la bainita. El Si es, por tanto, un elemento esencial para conseguir una austenita residual predeterminada en la que el C esté disuelto en la fase sólida en una alta concentración. Además, el Si tiene un efecto de refuerzo de la solución sólida y es efectivo para conseguir una alta resistencia. Para conseguir estos efectos es necesario como mínimo un 1,0% de Si. Por el contrario, si la concentración de Si

es excesiva, aumenta la proporción de la austenita residual, con lo que se reduce la resistencia. Así, la concentración de Si se ajusta a como máximo un 2,0%.

Mn: 0,1 al 1,0%

El Mn se añade como elemento desoxidante durante el refinamiento y estabiliza la austenita. Con el fin de conseguir la austenita residual descrita en la presente invención, es necesario añadir el Mn en como mínimo un 0,1%. Por otro lado, si la concentración de Mn es excesiva se produce una segregación, con lo que se reduce fácilmente la capacidad de mecanización. Así, la concentración de Mn se ajusta a un máximo del 1,0%.

Cr: 0,1 a 1,0%

El Cr mejora la posibilidad de enfriamiento rápido de un material de acero y facilita la solidificación. El Cr retarda, además, la transformación perlítica, con lo que se consigue de modo fiable la estructura de bainita durante el enfriamiento después del calentamiento de austenitización, impidiendo la generación de la estructura perlítica. Así, es necesario añadir Cr en una cantidad mínima del 0,1%. Por otro lado, si el Cr se añade en una cantidad superior al 1,0% se generan fácilmente carburos de hierro y resulta difícil generar la austenita residual. Por tanto, la concentración de Cr se ajusta a un máximo del 1,0%.

P, S: como máximo un 0,035%

El P y el S facilitan la fractura de la superficie límite por granos mediante la segregación de los límites intergranulares. Por tanto, es deseable que las concentraciones de P y S sean inferiores, sin embargo una reducción de las concentraciones de P y S es costosa en cuanto al refinamiento, ya que son impurezas. Por tanto, los límites superiores de las concentraciones de P y S se ajustan a un 0,035%. De preferencia, las concentraciones de P y S no superan el 0,01%.

A continuación se describen las razones para limitar las proporciones superficiales de las estructuras en sección transversal. La “sección transversal“ es una sección transversal que cruza ortogonalmente una dirección longitudinal de un alambre para muelles.

Bainita: como mínimo un 65%

La bainita es una estructura metálica que se consigue por transformación isotérmica de un material de acero austenitizado en un rango de temperaturas no superior a aproximadamente 550ºC y superior a la temperatura de inicio de la transformación martensítica. La bainita se compone de ferrita bainítica y carburo de hierro. Debido a que la ferrita bainítica como matriz tiene una alta densidad de dislocación y el carburo de hierro tiene un efecto reforzante de la precipitación, la estructura bainítica mejora la resistencia del material de acero. En el método de producción de un muelle en la Primera Realización, se utiliza un acero con contenido en Si en una alta concentración y se mantiene a una temperatura de punto Ms a (punto Ms + 60ºC), impidiendo que el carburo de hierro se vuelva más basto. La estructura bainítica consiste, por tanto, en una estructura donde precipita el carburo de hierro fino en la matriz de la ferrita bainítica, con lo que no se reduce en gran medida la resistencia del límite granular y la ductilidad y tenacidad no se reducen considerablemente aunque el material de acero tenga una alta resistencia. Así, la bainita constituye una estructura esencial para conseguir una alta resistencia y una alta ductilidad, y la proporción superficial de la misma es preferiblemente superior. Para conseguir una gran resistencia y una gran ductilidad según se describe en la presente invención se necesita como mínimo un 65% de proporción superficial de bainita. Por otro lado, la austenita sin transformar durante el paso isotérmico se convierte en martensita o austenita residual por enfriamiento subsiguiente hasta temperatura ambiente. Si el tiempo de mantenimiento isotérmico es corto, la concentración de carbono en la austenita que no se tranforma durante el paso isotérmico es bajam aumentando la proporción de martensita por enfriamiento subsiguiente y la proporción superficial de la bainita es inferior al 65%. Por consiguiente, cuando la proporción superficial de bainita es inferior al 65%, se consigue una alta resistencia debido a que la proporción de martensita es alta, pero aumenta considerablemente la sensibilidad a la formación de entalladuras, con lo que no se obtiene una resistencia superior a la fatiga.

Asutenita residual del 4 al 13%

La austenita residual aumenta la ductilidad y tenacidad mediante el fenómeno de plasticidad inducida por transformación (*TRIP)* y, por tanto, es efectiva para reducir la sensibilidad a las muescas. Por otro lado, aumenta el volumen de la austenita en una zona donde se concentra la tensión en un extremo de una grieta mediante la transformación martensítica inducida por deformación (*strain-induced)* y se aplica una tensión de compresión mediante la resistencia a la rotura por tracción en los entornos de la misma, con lo que se reduce el grado de concentración de tensiones y la velocidad de crecimiento de las grietas. Además, la austenita residual se transforma en martensita por transformación inducida por deformación en un paso de granallado. En este caso se expande el volumen de la austenita residual, con lo que se proporciona una alta tensión residual

de compresión en una capa superficial hasta profundamente al interior. La capa superficial que se procesa por granallado contiene austenita residual en una proporción menor que la parte interior, pero como mínimo es necesario una proporción de austenita residual de un 4% en una sección transversal para conseguir el efecto de prevención de la aparición de grietas. Por otro lado, si la proporción de austenita residual es demasiado alta, se reduce considerablemente la resistencia del material de acero. Así, la proporción de austenita residual se ajusta a como máximo un 13%.

Martensita: equilibrio (o 0%)

La martensita no es esencial en la presente invención, pero puede inducirse en una relación superficial del 5 al 30% con el fin de obtener una resistencia a la tracción predeterminada. Si la relación superficial de la martensita sobrepasa el 30% se obtiene una alta resistencia, pero se aumenta la sensibilidad a las muescas, por lo que no se obtiene una resistencia superior a la fatiga.

Concentración media de carbono en la austenita residual: 0,65 al 1,7%

Cuando la concentración de carbono en la austenita residual es superior, la deformación por tracción para iniciar la transformación martensítica inducida por deformación es superior, consiguiéndose una alta ductilidad y tenacidad y reduciendo la sensibilidad a entalladuras. Además, si la concentración de carbono en la austenita residual es superior, es superior la proporción de la expansión del volumen durante la transformación martensítica de la austenita residual inducida por deformación. En este caso se reduce la concentración de tensiones en un extremo de una grieta y se facilita la generación de una tensión residual alta de compresión profundamente hasta el interior. Por tanto, una concentración superior de carbono en la austenita residual es efectiva para mejorar la resistencia a la fatiga. Con el fin de obtener una distribución de la tensión residual de compresión (tensión residual máxima de compresión no inferior a 800 MPa) es necesario como mínimo un 0,65% de la concentración media de carbono en la austenita residual. La distribución de la tensión residual de compresión se describe más adelante. Por otro lado, si la concentración de carbono en la austenita residual es demasiado alta, se estabiliza considerablemente la austenita residual, con lo que la austenita residual no está sometida a una transformación inducida por deformación y existe solamente como una fase suave. Se ajusta consecuentemente el límite superior de concentración media de carbono en la austenita residual a un 1,7%.

Distribución de la tensión residual de compresión en la capa superficial

La tensión residual de compresión se proporciona en una capa de la superficie principalmente por chorreado con granalla. En la presente invención, además de la tensión residual de compresión que se obtiene por granallado normal, se proporciona una mayor tensión de compresión en profundidad al interior mediante la transformación martensítica inducida por deformación de la austenita residual presente en el acero. El espesor de la capa de tensión residual de compresión en la capa superficial de la superfice se ajusta a 0,35 mm con D/4, donde D (mm) es un diámetro equivalente al círculo de una sección transversal. Esto es debido a que un área desde la superficie hasta la profundidad de 200 µm con aproximadamente D/4 tiende a ser el punto de inicio de un fallo por fatiga, debido a la tensión combinada de la tensión residual y tensión aplicada por una carga externa cuando un alambre para muelles tiene por ejemplo un diámetro de1,5 a 15 mm. Por tanto es insuficiente un espesor inferior a 0,35 mm de la capa de tensión residual de compresión para prevenir el fallo por fatiga que se inicia del interior. Por otro lado, si el espesor de la capa de tensión residual de compresión es demasiado grande, la resistencia residual de tracción aumenta considerablemente para equilibrar la tensión en la totalidad del material de acero. La resistencia residual a la tracción está presente en un área más profunda que la profundidad (punto de intersección) en la que la tensión residual de compresión es igual a cero. La tensión residual de tracción se combina con la tensión de tracción que se genera en el alambre para muelles con una carga externa y facilita la aparición de grietas. Así, el límite superior para el espesor de la capa de tensión residual de compresión se ajusta en D/4.

La capa de tensión residual de compresión se realiza de modo que tiene una tensión residual máxima de compresión de 800 a 2.000 MPa. La tensión residual compresiva máxima es preferiblemente superior con el fin de prevenir la aparición y el crecimiento de grietas por fatiga, y son necesarios como mínimo 800 MPa de tensión residual compresiva máxima teniendo en cuenta que se utiliza el muelle con un ajuste teórico de alta tensión. Por otro lado, si la tensión residual compresiva en la capa superficial es demasiado grande, la tensión residual de tracción en el área a más profundidad que el punto de intersección que se genera para equilibrar la tensión, puede producir fractura interna según se describe más arriba. Por tanto, se ajusta el límite superior de la tensión residual compresiva máxima en 2.000 MPa.

Distribución de la dureza

Con el fin de conseguir la necesaria resistencia que es suficiente para resistir una carga como un muelle, es necesaria una dureza de Vickers mínima de 550 HV en el centro (centro de gravedad) de una sección

transversal de un alambre para muelles. Por otro lado, si la dureza es demasiado alta generalmente se reduce el alargamiento y aumenta la sensibilidad a la formación de entalladuras (grietas) del material de acero, con lo que puede reducirse la resistencia a la fatiga. Por esta razón, se ajusta la dureza en el centro de una sección transversal de un alambre para muelle en un máximo de 650 HV. Una capa de gran dureza en la capa superficial del muelle es efectiva para prevenir la formación de grietas y requiere una dureza Vickers mayor que la del centro (centro de gravedad) en como mínimo 50 HV. Por otro lado, si la dureza de la capa de gran dureza es demasiado alta, la capa de alta dureza se hace frágil. En consecuencia, se ajusta el límite superior de la diferencia de la dureza entre la capa de gran dureza y el centro para que no supere 500 HV. Además, se necesitan como mínimo 0,05 mm de espesor para la capa de gran dureza para prevenir la formación de grietas. Por otro lado, si la capa de gran dureza tiene un espesor demasiado grande, puede reducirse la tenacidad del material de acero. Por tanto, se ajusta el espesor de la capa de gran dureza en como máximo 0,3 mm.

Se describe un método de producción de un muelle según la presente invención. El muelle de la presente invención se produce como sigue. Después de enfriar el material de acero, con la composición química según se describe más arriba, se esmerilizan ambas superficies extremas del material de acero enrollado. Después se somete el material de acero a un paso de tratamiento térmico. Durante el paso del tratamiento térmico se austenitiza el material de acero enrollado a una temperatura entre el punto Ac3 y (punto Ac3 + 250ºC) y se enfría a una velocidad de enfriamiento mínima de 20ºC/segundo. El material de acero enfriado se mantiene entonces a una temperatura entre el punto Ms y (punto Ms + 60ºC) durante como mínimo 400 segundos y se deja enfriar a temperatura ambiente a una velocidad de enfriamiento mínima de 20ºC/segundo. A continuación, se somete el materiial de acero enrollado a un chorreado de granalla. La estructura del material de acero, antes de calentarlo hasta como mínmo el punto Ac3, no queda específicamente limitada. Como material de acero se puede utilizar, por ejemplo, una barra de acero forjada en caliente o una barra de acero laminada. A continuación se describe cada paso y también se describen, según se requieran, las razones para las limitaciones.

Paso de enrollamiento

El paso del enrollamiento es un paso de conformado en frío del material de acero para obtener una forma en espira predeterminada. El conformado puede realizarse empleando una máquina formadora de muelles (bobinadora) o empleando una barra colada previamente. La presente invención no se limita a un muelle helicoidal y puede tener aplicación a cualquier muelle, por ejemplo un muelle laminado, una barra de torsión, un estabilizador o similar.

Paso de esmerilado de la superficie de contacto

En este paso se esmerilizan ambas superfices extremas del material de acero enrollado para obtener superficies planas perpendiculares a un eje del mismo. Este paso se realiza según necesidad.

Paso de tratamiento térmico

En este paso se austenitiza y enfría el material de acero enrollado para mantenerlo a continuación isotérmicamente y se enfría. El mantenimiento isotérmico puede realizarse, por ejemplo, sumergiendo el material de acero enrollado en un baño de sal, pero no debe realizarse forzosamente con un baño de sal y puede realizarse por otro método, como un método que utiliza un baño de plomo. La estructura del material de acero antes de la austenitización no está específicamente limitada. Se puede usar como material de acero, por ejemplo, una barra de acero forjada en caliente o una barra de acero laminada. La temperatura de austenitización se ajusta a una temperatura entre el punto Ac3 y (punto Ac3 + 250ºC). Si la temperatura de austenitización es inferior al punto Ac3, no se austenitiza el material de acero enrollado y no se obtiene una estructura predeterminada. Por otro lado, si la temperatura de austenitización sobrepasa (punto Ac3 + 250ºC), los diámetros de los granos anteriores de austenita tienden a aumentar, con lo que se reduce la ductilidad.

La tasa de enfriamiento del material de acero enfriado hasta temperatura de mantenimiento isotérmico después de la austenitización es preferiblemente alta y el enfriamiento debe realizarse a una veocidad de enfriamiento mínima de 20ºC/segundo, preferiblemente como mínimo 50ºC/segundo. Si la tasa de enfriamiento es inferior a 20ºC/segundo, se forma perlita durante el enfriamiento y no se obtiene la estructura descrita en la presente invención. Es necesario ajustar la temperatura de mantenimiento isotérmico a una temperatura de punto Ms a (punto Ms + 60ºC), siendo un parámetro muy importante a controlar durante el método de producción del muelle de la presente invención. Si la temperatura de mantenimiento isotérmico es inferior al punto Ms, la martensita que se forma en una fase inicial de la transformación impide el mejoramiento de la ductilidad y no se obtiene la proporción de bainita descrita en la presente invención. Por otro lado, si la temperatura de mantenimiento isotérmico sobrepasa (punto Ms + 60ºC), aumenta demasiado la proporción de austenita residual, con lo que se reduce la resistencia a la tracción y no se obtiene la resistencia suficiente para soportar una carga en forma de muelle. El tiempo de mantenimiento isotérmico debe ajustarse a como mínimo 400 segundos, lo que también

es un parámetro muy importante a controlar en el método de producción del muelle de la presente invención. Si el tiempo de mantenimiento es inferior a 400 segundos, difícilmente se produce la transformación bainítica, con lo que aumenta la proporción de martensita y se reduce la proporción de bainita y no se obtiene la estructura descrita en la presente invención. Por otro lado, si el tiempo de mantenimiento es demasiado largo, no se sigue formando bainita y aumenta el coste de producción. Así, el tiempo de mantenimiento es preferiblemente de como máximo 3 horas.

La tasa de enfriamiento después del mantenimiento isotérmico es preferiblemente alta para obtener una estructura uniforme y debe ajustarse en como minimo 20ºC/segundo, de preferencia como mínimo 50ºC/segundo. Específicamente se prefiere el enfriamiento en aceite o agua. Por otro lado, si la tasa de enfriamiento es inferior a 20ºC/segundo, la estructura tiende a ser diferente entre la superficie del material de acero y la parte interior, con lo que es posible que no se consiga la estructura descrita en la presente invención.

Paso de chorreado de granalla

El chorreado de granalla es un método para proporcionar tensión residual de compresión en una superficie del material de acero enrollado produciendo una colisión por el impacto de granalla metálica o de arena sobre el material de acero enrollado, con lo que mejora la resistencia a la flexión elástica y a la fatiga. En la presente invención, además de la tensión residual de compresión que se obtiene por un chorreado normal, se proporciona una tensión residual de compresión profundamente hacia el interior por la transformación martensítica inducida por deformación de la austenita residual. El granallado puede realizarse utilizando el impacto de trozos de alambre, perlas de acero, partículas de gran dureza como del tipo FeCrB o similares. El grado de la tensión residual de compresión puede ajustarse con un diámetro equivalente al círculo del material de granalla, la velocidad de la granalla, el tiempo de impacto y un proceso de impacto en múltiples pasos.

Además, mediante el chorreado de granalla se produce una transformación inducida por deformación de la austenita residual que se transforma en martensita, de mayor resistencia. El resultado es que se produce una expansión del volumen de acuerdo con la transformación, con lo que se proporciona una gran resistencia residual de compresión y aumenta todavía más el efecto de fijación de dislocaciones. En consecuencia, mejora todavía más la resistencia a la flexión elástica.

Paso de compresión

Opcionalmente se realiza un paso de compresión proporcionando una deformación plástica en el material de acero enrollado con el fin de mejorar el límite elástico y reducir la magnitud de la flexión elástica (magnitud de ajuste permanente) durante el uso. Al realizarse la compresión (compresión en caliente) a una temperatura entre 200 y 300ºC, mejora todavía más la resistencia a la flexión elástica. Mediante esta compresión, la austenita residual sufre una transformación inducida por deformación y se transforma en martensita, con una resistencia superior. El resultado es que se produce un aumento de volumen de acuerdo con la transformación, proporcionando una alta tensión residual de compresión e incrementando más el efecto de fijación de dislocaciones. Por tanto, mejora todavía más la resistencia a la flexión elástica.

2. Segunda realización

Se describe un muelle y un método de producción del mismo de la segunda realización de la presente invención.

La composición química del material de acero y varias características de la sección transversal del alembre para muelles para el muelle de la Segunda Realización de la presente invención son las mismas que en el caso de la Primera Realización. Además, las proporciones de áreas de las estructuras en sección transversal son las mismas que en el caso de la Primera Realización, excepto en lo que se refiere a la limitación de un diámetro de grano medio equivalente al círculo de la austenita residual. Por tanto, solamente se describe esta diferencia.

Diámetro medio de grano equivalente al círculo de la Austenita Residual: no más de 3 μm

Según se describe más arriba, la austenita residual con una alta concentración de carbono tiene una gran resistencia y se consigue el efecto de fijación de las dislocaciones mediante la dispersión de granos finos de la austenita residual con una gran resistencia, con lo que mejora la resistencia a la flexión elástica. Si un diámetro medio de grano equivalente a círculo de la austenita residual sobrepasa los 3 μm, no se dispersa lo suficiente la austenita fina, con lo que no se obtiene un efecto suficiente para la fijación de dislocaciones.

El método de producción del muelle en la Segunda Realización de la presente invención es el mismo que el de la Primera Realización, excepto que se realiza el mantenimiento isotérmico a una temperatura entre (punto Ms

– 20ºC) y (punto Ms + 60ºC) en el paso del tratamiento térmico. Por tanto, a continuación se describe solamente la diferencia.

En el método de producción del muelle de la Segunda Realización de la presente invención es necesario ajustar la temperatura de mantenimiento isotérmico a una temperatura entre (punto Ms – 20ºC) y (punto Ms + 60ºC), lo que constituye un parámetro muy importante a controlar durante el método de producción para obtener el acero para muelles y el muelle de la presente invención. Si la temperatura de mantenimiento isotérmico es inferior a (punto Ms – 20ºC), se genera un exceso de martensita en una fase inicial de la transformación y se impide mejorar la ductilidad, no se obtiene bainita en una proporción superficial mínima del 65%. Por otro lado, si la temperatura del mantenimiento isotérmico sobrepasa la temperatura (punto MS + 60ºC), la bainita se vuelve más gruesa, con lo que se reduce la resistencia a la tracción y no se obtiene una resistencia suficiente para soportar una carga en forma de muelle. Mediante el mantenimiento isotérmico a una temperatura alrededor del punto Ms precipita la bainita fina. Al precipitar la bainita fina, la austenita permanece en espacios microscópicos y la austenita residual tiene así granos con un diámetro de grano medio equivalente al círculo de no más de 3 µm.

Ejemplos

1. Primer ejemplo

Se preparó una varilla de alambre de temple austenítico con una composición según la Tabla 1 y se enrolló en frío hasta un perfil predeterminado con una bobinadora, con lo que se obtuvieron alambrones enrollados. Los alambrones enrollados se sometieron a un tratamiento térmico según se muestra en la Tabla 3. Durante el tratamiento térmico se calentaron los alambrones hasta una temperatura entre el punto Ac3 y (punto Ac3 + 250ºC) en un horno calentador y se austenitizaron. A continuación se mantuvieron los alambrones en un baño de sal que se mantuvo a una temperatura de T (ºC) durante un tiempo t (segundos) y se enfriaron. La temperatura T y el tiempo se muestran en la Tabla 3. A continuación se sometieron los alambrones a un chorreado de granalla. Para el granallado se utilizaron, en un primer paso, alambres redondos cortados con un diámetro equivalente a círculos de 0,8 mm. A continuación se utilizaron alambres redondos cortados con un diámetro equivalente a círculos de 0,45 mm y partículas de arena con un diámetro equivalente a círculos de 0,1 mm en un segundo y un tercer paso, respectivamente. Además, se calentaron los alambrones enrollados hasta una temperatura de 230ºC y se sometieron a una compresión correspondiente a un esfuerzo cortante máximo de τ = 1473 MPa. Así se produjeron los muelles y las especificaciones de los muelles se muestran en la Tabla 2. Se investigaron diferentes características de la manera siguiente con relación a los muelles y los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 1

Tipo de acero	Composición química (%en masa) resto Fe e impurezas inevitables						Ac3(ºC)	Ms(ºC)
	C	Si	Mn	Cr	P	S		
SWOSC-V	0,57	1,42	0,66	0,67	0,010	0,008	806	284

Tabla 2

Tipo de acero	SWPSC-V
Diámetro del alambre	4,1 mm
Diámetro medio de la espira	24,6 mm
Espiras totales	5,75
Espiras activas	3,25
Dirección de enrollamiento	Enrollamiento a derechas
Altura libre	56,5 mm
Constante del muelle	57,3 N/mm

Nº	T (ºC)	t (s)	Propor. Superfi bainita (B) (%)	Propor. Superfi austenita residual (τR) (%)	Propor superficima rtensita (%)	Concent. carbono en austenita residual (% en masa)	Dureza parte central (HV)	Espesor capa superficial dureza mayor que parte central en 50 a 500 HV (mm)	Tensión residual compres. máxima (MPa)	Espesor capa de tensión residual compres. (mm)	Resist a la fatiga	
1	250	1200	72,2	11,7	16,1	0,58	678	0,07	874	0,36	mala	Ej. Comp.
2	300	300	6,2	7,8	86,0	0,59	704	0,06	788	0,32	mala	Ej. Comp
3	300	1200	81,2	8,6	10,2	1,22	614	0,09	972	0,46	buena	Ej. Práctico
4	300	2400	83,5	7,3	9,2	1,37	598	0,12	1017	0,50	buena	Ej. Práctico
5	350	1200	73,6	16,5	9,9	1,52	515	0,04	561	0,28	mala	Ej. Comp

Tabla 3

Identificación de fases en estructuras y concentración de carbono en la austenita residual

Las fases en la estructura se identificaron como sigue. Se pulió una sección transversal de una muestra y la muestra se sumergió durante unos pocos segundos en nital (solución al 3% de ácido nítrico y alcohol). En la estructura de la sección transversal el nital corroe fácilmente la bainita, por lo que ésta aparece en negro o gris en una micrografía óptica. Por otro lado, la martensita y la austenita residual tienen una alta resistencia a la corrosión frente al nital, por lo que aparecen en blanco en una micrografía óptica. Utilizando estas funciones se procesa una imagen de una micrografía óptica, midiéndose la proporción de bainita (partes negras y partes grises) y la proporción total de martensita y austenita residual (parte blanca). La proporción de austenita residual se midió por el método de difracción de rayos X en relación a una muestra de acabado pulido. La proporción de martensita se calculó restando la proporción de austenita residual, obtenida por el método de difracción de rayos X, de la proporción total de martensita y austenita residual obtenida por micrografía óptica. La concentración media de carbono en la austenita residual se calculó con la siguiente expresión de relación utilizando la constante de red a (nm). La constante de red se midió desde cada ángulo pico de difracción de (111), (200), (220) y (311) mediante difracción de rayos X. Estos resultados también se muestran en la Tabla 3.

Primera fórmula

$$A(nm) = 0,3573 + 0,0033 \times (\%\ en\ masaC)$$

Además se evaluó la validez de este método con otros medios. Las figuras 1A a 1D muestran los resultados de la evaluación de un área existente a una profundidad de 1,025 mm desde la superficie circunferencial exterior hacia el centro de una sección transversal del muelle de alambre de una muestra No. 3 de un ejemplo práctico de la presente invención. La figura 1A muestra un resultado de la observación de una imagen electrónica de reflexión (SEM (Microscopía Electrónica de Escaneo)). La figura 1C muestra un resultado de medición de un mapa de estructura cristalina (fase) (EBSD (Difracción Electrónica de Retrodispersión). La figura 1 muestra el resultado del análisis de la concentración de carbono en el eje I-II de la figura 1B. La concentración de carbono es diferente en cada una de las austenitas residuales y era aproximadamente del 1,2 al 1,5% en la zona A de la figura 1B y aproximadamente del 1,3 al 1,7% en la zona B de la figura 1B. Estas concentraciones de carbono son aproximadamente iguales a la concentración media de carbono de 1,22% medida por difracción de rayos X. El método de medición de la concentración de carbono en la austenita residual mediante difracción de rayos X es, por tanto, razonable.

Dureza Vickers en la Parte Central

La dureza Vickers se midió en cinco puntos alrededor de la parte central de una sección transversal del muelle y se calculó el promedio correspondiente como dureza Vickers en la parte central.

Espesor de la Capa de Alta Dureza

Se midió la dureza Vickers desde la superficie exterior circunferencial hacia el centro de una sección transversal del material de acero y se midió el espesor de una capa de alta dureza con una dureza Vickers superior a la del centro en 50 a 500 HV.

Distribución de la tensión residual

Se midió la tensión residual con respecto a la superficie exterior circunferencial del material de acero empleando el método de difracción de rayos X. A continuación se pulió químicamente toda la superficie del material de acer y se realizó de nuevo la medida. Mediante la repetición de estos pasos se obtuvo la distribución de la tensión residual en dirección de la profundidad.

Resistencia a la fatiga

Se realizó un ensayo de fatiga con una tensión media τ m de 735 MPa y una amplitud de tensión τ a de 637 MPa. Se determinó que la muestra que resistió mas de 1 x 10^7 veces tenía una resistencia superior a la fatiga y se califica como “buena“ en la Tabla 3. Se determinó que la muestra que se rompió antes de 1 x 10^7 veces tenía una resistencia inferior a la fatiga y se califica como “mala“ en la Tabla 3. En la Tabla 3 se muestran los resultados de la comprobación de varias características.

Las muestras No. 3 y 4 que cumplían las condiciones descritas en la presente invención, mostraban una resistencia superior a la fatiga. Por el contrario, las muestras No. 1, 2 y 5 que no cumplían las condiciones descritas en la presente invención tenían una resistencia insuficiente a la fatiga, ya que ningúna ellas cumplía las siguientes condiciones. Esto es, en el ejemplo nº 1 la temperatura de mantenimiento isotérmica era inferior

al punto Ms en el paso del tratamiento térmico con lo que la martensita generada en la fase inicial de la transformación aumentó excesivamente la dureza en la parte central e impidió mejorar la ductilidad.

En la muestra nº 2 el tiempo de mantenimiento isotérmico durante el paso del tratamiento térmico era corto, con lo que la proporción de martensita resultó alta. Por tanto, era pequeña la proporción de bainita, con lo que aumentó excesivamente la dureza en la parte central. En la muestra nº 5 la temperatura de mantenimiento isotérmica durante el paso del tratamiento térmico erá demasiado alta, con lo que aumentó excesivamente la proporción de austenita residual y la dureza en la parte central era demasiado baja. Además, aunque la austenita residual se transformó en martensita inducida por deformación, la cohesión de los correspondientes alrededores era baja ya que la dureza era baja, con lo que la tensión residual de compresión resultó baja y la capa de tensión residual de compresión era delgada.

2. Segundo ejemplo

Los muelles de las muestras No. 6 a 11 se produjeron de la misma forma que en el Primer Ejemplo excepto que el tratamiento térmico se realizó como sigue: el alambrón enrollado se calentó hasta 850ºC en un horno calentador y se austenitizó para después introducirlo en un baño de sal que se mantuvo a una tempertura T (ºC) durante un tiempo t (segundos) y se enfrió. La temperatura T y el tiempo t se muestran en la Tabla 4.

Se comprobaron diferentes características de la siguiente forma con respecto a los muelles y los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 4. Se evaluaron de la misma manera que en el Primer Ejemplo la identificación de las fases en la estructura, la concentración media de carbono en la austenita residual, la dureza Vickers en la parte central, el espesor del área de alta dureza y la distribución de la tensión residual, por lo que se omiten las correspondientes descripciones.

No.	T (ºC)	T(s)	Propor superf. bainita (B)(%)	Propor superfi austenita residual (YR)(%)	Propor Superf martensita %	Conc. carbono austenita residual (% en masa)	Media granos austenita residual (µm)	Dureza en parte central (HV)	Espesor en capa superf. mayor dureza que central en 50 a 500 HV (mm)	Tensión residual de comp máx. (MPa)	Espesor capa tens. resid. de comp. (mm)	Rest. a flexión elást.	
7	280	3600	86,7	7,4	5,9	1,38	1,0	626	0,10	1113	0,38	muy buena	Ej. Práct.
8	300	300	6,2	7,8	86,0	0,59	1,3	704	0,06	788	0,32	mala	Ej. Comp
9	300	1200	81,2	8,6	10,2	1,22	1,2	614	0,09	972	0,46	buena	Ej. Práct.
10	300	2400	83,5	7,3	9,2	1,37	1,0	598	0,12	1017	0,50	muy buena	Ej. Prácti
11	350	1200	73,6	16,5	9,9	1,52	3,7	515	0,04	561	0,28	mala	Ej. Comp.
Nota: La línea de subrayado indica que el valor no cumple las condiciones descritas en la presente invención.													

Tabla 4

Díametro equivalente a círculo de Granos de Austenita Residual

En primer lugar se identificó un mapa de estructura cristalina de la fase γ-Fe que se puede obtener mediante el método EBSD. A continuación de midieron los diámetros equivalentes a círculos de los granos de austenita residual utilizando el software de procesamiento de imagen.

Resistencia a la flexión elástica

Se realizó un ensayo de la flexión elástica como sigue. Se fijó la muestra mientras se comprimía por aplicación de una carga de manera que el esfuerzo cortante máximo era de 1.372 MPa y se sumergió la muestra en aceite de silicona a 120ºC. 48 horas después de sumergir la muestra, se sacó del aceite de silicona y se retiró la carga cuando se enfrió la muestra hasta una temperatura ambiente. Antes y después del ensayo de flexión elástica, se midió una carga aplicada para comprimir el muelle hasta una altura predeterminada y se obtuvo una magnitud reducida de ΔP de la carga. La magnitud reducida de ΔP se sustituyó en la siguiente fórmula y se calculó el esfuerzo cortante residual (γ) como la magnitud de la flexión elástica.

Segunda fórmula

$$\gamma = \{8D/(\pi d^3 d^3 G)\} \times \Delta P$$

D representa en la segunda fórmula el diámetro de espiral medio, d representa el diámetro del alambre y G representa un módulo de elasticidad de cizallamiento (= 78.500 MPa). Se determinó que la muestra con un esfuerzo cortante residual de no más de 10×10^{-4} tenía una excelente resistencia a la flexión elástica y se califica como “muy buena“ en la tabla 4. En cuanto a la muestra con un esfuerzo cortante residual superior a 10×10^{-4} y no más de 15×10^{-4} se determinó que tenía una resistencia a la flexión elástica superior y se califica en la Tabla con “buena“. En lo que se refiere a la muestra con un esfuerzo cortante residual superior a 15×10^{-4} se determinó que tenía una resistencia a la flexión elástica inferior y se califica en la tabla 4 con “mala“. En la tabla 4 se muestran los resultados de la comprobación de diferentes características.

Las muestras No. 7, 9 y 10 que cumplían las condiciones según se describen en la presente invención tenían una resistencia superior a la flexión elástica. Por el contrario, las muestras 8 y 11, que no cumplían las condiciones de la presente invención, tenían los siguientes defectos. La concentración de carbono en la austenita residual era baja por lo que también era baja la resistencia de la austenita residual. El resultado es que la resistencia a la flexión elástica era inferior.

En el ejemplo No. 8 el tiempo de mantenimiento isotérmico en el paso del tratamiento térmico era corto, por lo que la proporción de bainita era baja. Consecuentemente, la proporción de martensita era alta, por lo que la dureza en la parte central aumentó excesivamente. Además, la concentración de carbono en la austenita residual era baja, por lo que la resistencia a la flexión elástica era inferior. Por otro lado, la expansión del volumen de acuerdo con la transformación martensítica inducida por deformación era relativamente pequeña, con lo que la tensión residual de compresión era baja y la capa de tensión residual de compresión resultó delgada.

En la muestra nº 11 la temperatura de mantenimiento isotérmico era demasiado alta en el paso del tratamiento térmico, con lo que se redujo la precipitación de carburos y aumentó excesivamente la concentraión de carbono en la austenita. Consecuentemente, se redujo considerablemente el punto Ms y tuvo lugar una estabilización de austenita, aumentando excesivamente la proporción de austenita residual y la dureza de la parte central era demasiado baja. Además, debido a que la temperatura de mantenimiento isotérmico era demasiado alta, precipitó bainita gruesa, con lo que el diámetro medio de los granos de austenita residual era superior a 3 μm. La resistencia a la flexión elástica era, consecuentemente, inferior. Por otro lado, aunque la austenita residual tuvo un aumento del volumen debido a la transformación martensítica inducida por transformación, la resistencia a la rotura por tracción de los correspondientes entornos era baja debido a la baja dureza, por lo que la tensión residual de compresión era baja y la capa de tensión residual de compresión era delgada.

Aplicación industrial

La presente invención puede aplicarse a muelles con el requisito de una alta resistencia a la fatiga, como pueden ser muelles de válvula para motores de automóvil o similares. La presente invención puede aplicarse, además, a cualquier muelle como pueden ser muelles helicoidales, muelles de hojas, barras de torsión, estabilizadores o similares.

Reivindicaciones

1. Muelle que consiste en,% en masa, el 0,5 al 0,7% de C, el 1,0 al 2,0% de Si, el 0,1 al 1,0% de Mn, el 0,1 al 1,0% de Cr, no más del 0,035% de P y no más del 0,035% de S y el resto de Fe e impurezas inevitables, donde el muelle tiene una estructura que incluye como mínimo un 65% de bainita y del 4 al 13% de austenita residual por relación superficial en una sección transversal, donde la austenita residual contiene carbono en una concentración media del 0,65 al 1,7%, donde la austenita residual tiene un diámetro de grano medio equivalente a un círculo máximo de 3 µm, la estructura incluye martensita del 5 al 30% en relación superficial en una sección transversal, el muelle tiene una capa de tensión residual de compresión en una sección transversal desde la superficie hasta una profundidad de 0,35 mm a D/4, donde D (mm) es un diámetro equivalente a un círculo de la sección transversal, la capa de tensión residual de compresión tiene una tensión residual máxima de compresión entre 800 y 2.000 MPa, y el muelle tiene una parte central con una dureza Vickers de 550 a 650 HV en una sección transversal y tiene una capa de gran dureza con una dureza superior a la de la parte central en 50 a 500 HV desde la superficie hasta una profundidad de 0,05 a 0,3 mm.

2. Muelle según la reivindicación 1, en el que la estructura incluye martensita en una cantidad del 5 al 30% por relación superficial en una sección transversal.

3. Muelle según la reivindicación 1 ó 2, donde el muelle se forma a partir de una varilla de alambre con un diámetro de 1,5 a 15 mm.

4. Muelle según la reivindicación 1, donde el muelle se forma a partir de un material de alambre con un diámetro medio equivalente circular de 1,5 a 15 mm en una sección transversal.

5. Método de producción de un muelle que comprende:

un paso de preparar una varilla de alambre que se compone de, en % en masa, un 0,5 a 0,7% de C, del 1,0 al 2,0% de Si, del 0,6 al 1,0% de Mn, del 0,1 al 1,0% de Cr, como máximo del 0,035% de P, como máximo del 0,035% de S y el resto de Fe e impurezas inevitables;
un paso de conformado de la varilla de alambre en un muelle;
uin paso de tratamiento térmico; y
un paso de chorreado de granalla, lanzando granalla sobre la varilla de alambre después del paso de tratamiento térmico, donde en el paso del tratamiento térmico se austenitiza la varilla de alambre a una temperatura entre el punto Ac3 y (punto Ac3 + 250ºC) y se enfría con una tasa de enfriamiento no inferior a 20ºC/segundo y después se mantiene la varilla de alambre a una temperatura entre (punto Ms -20ºC) y (punto Ms + 60ºC) durante como mínimo 400 segundos y se enfría hasta temperatura ambiente.

6. Método de producción para el muelle según la reivindicación 5, que comprende además un paso de compresión para proporcionar una fuerza de tracción permanente a la varilla de alambre después del paso de chorreado de granalla.

Fig. 1A

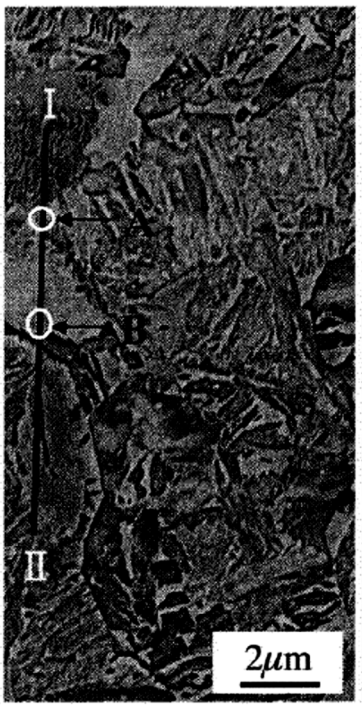
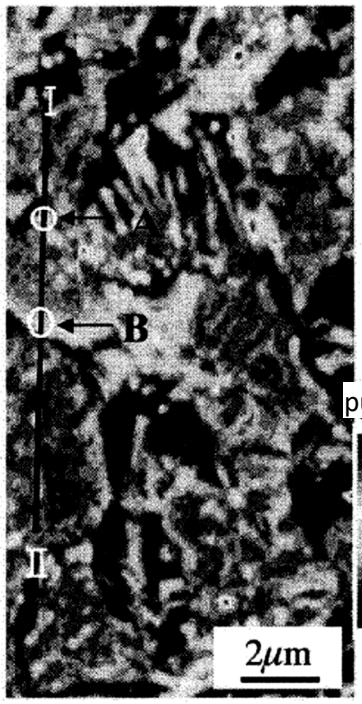


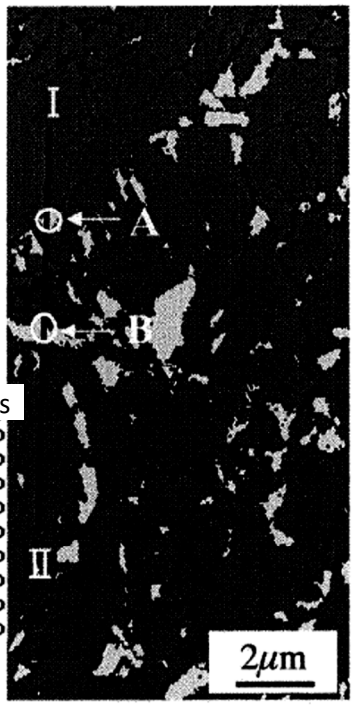
Imagen reflexión electrónica (SEM)

Fig. 1B



Mapa elemento carbono (FE-EPMA)

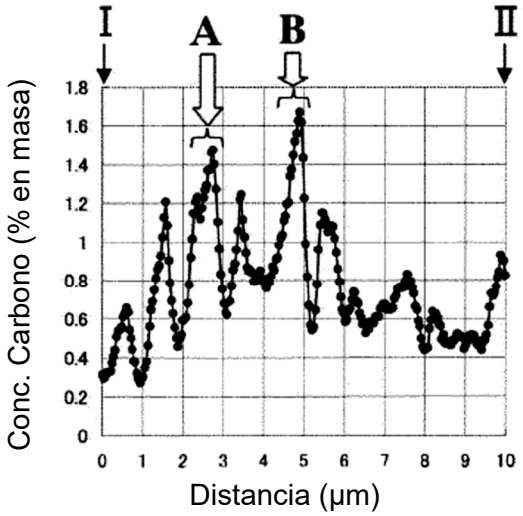
Fig. 1C



Mapa estructura cristalina (fase)(ESBD)

α -Fe
γ -Fe

Fig. 1D



Perfil de concentración de carbono en línea I-II (FE-EPMA)