

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 886 802**

51 Int. Cl.:

H01F 1/147 (2006.01)
C22C 33/04 (2006.01)
C22C 38/00 (2006.01)
C22C 38/02 (2006.01)
C22C 38/30 (2006.01)
C22C 38/34 (2006.01)
C22C 38/38 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.04.2016** **E 16167502 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **18.08.2021** **EP 3093858**

54 Título: **Aleaciones magnéticas de hierro y cobalto de muy bajo contenido en cobalto**

30 Prioridad:

04.05.2015 US 201514702933

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

20.12.2021

73 Titular/es:

**CARPENTER TECHNOLOGY CORPORATION
(100.0%)
P.O. Box 14662
Reading, PA 19612-4662, US**

72 Inventor/es:

JAYARAMAN, TANJORE V.

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 886 802 T3

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

DESCRIPCIÓN

Aleaciones magnéticas de hierro y cobalto de muy bajo contenido en cobalto

Campo técnico

La invención se refiere, en general, a un procedimiento de producción de aleaciones de hierro-cobalto que contienen menos o igual al 10 % en peso de cobalto.

Antecedentes

Las aleaciones de hierro-cobalto son conocidas en la industria por proporcionar un alto grado de saturación magnética. En particular, 49Co-Fe-2V (aleación HIPERCO® 50 disponible en Carpenter Technology Corporation) es una aleación comercialmente disponible que proporciona la mayor inducción de saturación magnética y 27Co-Fe (aleación HIPERCO® 27, también disponible en Carpenter) es conocida por proporcionar un alto grado de saturación magnética junto con una ductilidad y tenacidad relativamente altas. Cada una de estas aleaciones contiene una gran cantidad de cobalto (aproximadamente el 50% para el HIPERCO® 50, y el 27% para el HIPERCO® 27). El cobalto es un metal caro y aumenta mucho los costes. En las aplicaciones aéreas, el coste de estas aleaciones se justifica por sus superiores propiedades magnéticas y eléctricas a temperatura ambiente y a alta temperatura, combinadas con unas adecuadas propiedades mecánicas. Sin embargo, para las aplicaciones terrestres y marinas se necesita una aleación magnética blanda menos costosa, que conserve las propiedades magnéticas y eléctricas superiores junto con unas propiedades mecánicas y una resistencia a la corrosión adecuadas. Las aplicaciones terrestres y marinas ejemplares incluyen volantes, cojinetes mecánicos, solenoides, motores de reluctancia, generadores, inyectores de combustible y transformadores. Además, se necesita una aleación magnética blanda con una mayor resistividad eléctrica para que la aleación sea adecuada tanto para aplicaciones de corriente alterna como de corriente continua.

El documento WO 02/31844 A2 divulga una aleación de hierro con 7-17% en peso de Co, pero restringe un procedimiento de recocido final a 2 temperaturas para un contenido de Co de 14-16% en peso, mientras que sugiere un recocido a una sola temperatura para contenidos de Co inferiores.

Sumario

Para satisfacer estas y otras necesidades, y en vista de sus objetivos, la presente invención proporciona un procedimiento de producción de aleaciones magnéticas de hierro-cobalto con cobalto ultrabajo, como se especifica en la reivindicación 1. La composición incluye una aleación magnética de hierro que tiene hierro, aproximadamente 2 % en peso a aproximadamente 10 % en peso de cobalto, aproximadamente 0,05 % en peso a aproximadamente 5 % en peso de manganeso y aproximadamente 0,05 % en peso a aproximadamente 5 % en peso de silicio. La aleación puede tener además uno o más de los siguientes elementos: cromo hasta aproximadamente el 3 % en peso, vanadio hasta aproximadamente el 2 % en peso, níquel hasta aproximadamente el 1 % en peso, niobio hasta aproximadamente el 0,05 % en peso y carbono hasta aproximadamente el 0,02 % en peso. La aleación puede tener una resistividad eléctrica (ρ) de al menos aproximadamente 40 $\mu\Omega\text{cm}$. La aleación puede tener una inducción de saturación (B_s) de al menos aproximadamente 20 kG, siendo 1 kG = 0,1 T. La aleación puede tener una coercitividad (H_c) menor de aproximadamente 2 Oe, siendo 1 Oe = 1000/4 π A/m = 79,6 A/m. La aleación puede incluir principalmente una única fase alfa.

En lo sucesivo, una "realización de la invención" se referirá a un producto obtenido directamente por el procedimiento de la reivindicación 1. Los sinónimos son "ejemplos de trabajo" o "ejemplos", excepto cuando se designan explícitamente como controles.

Breve descripción de los dibujos

La invención se entenderá mejor a partir de la siguiente descripción detallada cuando se lea junto con el dibujo adjunto. Se subraya que, según la práctica habitual, las distintas características del dibujo no están a escala. Por el contrario, las distintas características se amplían o reducen arbitrariamente para mayor claridad. En el dibujo se incluyen las siguientes figuras:

La FIG. 1A es un gráfico que representa la inducción de saturación (B_s), la coercitividad (H_c) y la resistividad eléctrica (ρ) para una serie de aleaciones que tienen aproximadamente un 10 % en peso de cobalto (Co) en comparación con HIPERCO® 27 y una muestra de control sustancialmente libre de Co, según una realización de la invención;

La FIG. 1B es un gráfico que representa B_s , H_c , y ρ para una serie de aleaciones que tienen aproximadamente 8 en peso.% de Co en comparación con HIPERCO® 27 y una muestra de control sustancialmente libre de Co, según realizaciones de la invención;

La FIG. 1C es un gráfico que representa B_s , H_c y p para una serie de aleaciones que tienen aproximadamente un 5 % en peso de Co en comparación con HIPERCO® 27 y una muestra de control sustancialmente libre de Co, según las realizaciones de la invención;

5 La FIG. 2A es un gráfico que representa el límite elástico del 0,2% para tres series de aleaciones que tienen aproximadamente 10 % en peso de Co, aproximadamente 8 % en peso de Co y aproximadamente 5 % en peso de Co en comparación con una muestra de control sustancialmente libre de Co, según las realizaciones de la invención;

10 La FIG. 2B es un gráfico que representa la resistencia a la tracción final para tres series de aleaciones que tienen aproximadamente 10 % en peso de Co, aproximadamente 8 % en peso de Co y aproximadamente 5 % en peso de Co, en comparación con una muestra de control sustancialmente libre de Co, según las realizaciones de la invención;

15 La FIG. 2C es un gráfico que representa el alargamiento para tres series de aleaciones que tienen aproximadamente 10 % en peso de Co, aproximadamente 8 % en peso de Co y aproximadamente 5 % en peso de Co en comparación con una muestra de control sustancialmente libre de Co, según las realizaciones de la invención;

La FIG. 3A es un gráfico que representa los espectros de difracción de rayos X de cuatro aleaciones según las realizaciones de la invención;

La FIG. 3B es una micrografía óptica de una primera aleación según una realización de la invención;

La FIG. 3C es una micrografía óptica de otra aleación según una realización de la invención; y

20 La FIG. 4 es un gráfico que representa la pérdida de núcleo para tres aleaciones en comparación con HIPERCO® 27 y una muestra de control sustancialmente libre de Co, según una realización de la invención.

Descripción detallada

25 Las realizaciones de la invención proporcionan aleaciones magnéticas de hierro que incluyen cobalto y manganeso y que poseen una alta inducción de saturación magnética, alta resistividad, baja coercitividad, así como propiedades mecánicas relativamente buenas, incluyendo ductilidad y dureza. La aleación puede utilizarse en aplicaciones marinas y terrestres que requieran una combinación de buena tenacidad mecánica, buena ductilidad, alta inducción de saturación y alta resistividad eléctrica, como motores, generadores, rotores, estatores, piezas polares, relés, cojinetes magnéticos y similares. La alta resistividad eléctrica de las aleaciones permitirá además utilizarlas en
30 aplicaciones de corriente alterna, ya que una mayor resistividad eléctrica reduce las pérdidas por corrientes parásitas. Las realizaciones incluyen tanto las aleaciones como el procedimiento de producción de las mismas.

35 Como se utiliza en el presente documento, una "aleación" se refiere a una mezcla homogénea o solución sólida de dos o más metales, cuyos átomos de un metal sustituyen u ocupan posiciones intersticiales y/o sustitutivas entre los átomos de los otros metales. El término aleación puede referirse tanto a una aleación de solución sólida completa que puede dar una microestructura de fase sólida única como a una solución parcial que puede dar dos o más fases.

40 Como se utiliza en el presente documento y en las reivindicaciones, los términos "que comprende", "que tiene" e "incluye" son inclusivos o abiertos y no excluyen elementos, componentes de composición o pasos adicionales no citados. En consecuencia, los términos "que comprende", "que tiene" e "incluye" abarcan los términos más restrictivos "que consiste esencialmente en" y "que consiste en" A menos que se especifique lo contrario, todos los valores proporcionados en el presente documento incluyen hasta los puntos finales indicados, y los valores de los constituyentes o componentes de las composiciones se expresan en porcentaje en peso o % en peso de cada ingrediente de la composición.

Aleaciones magnéticas de hierro con cobalto, manganeso y silicio

45 Las realizaciones de la invención incluyen aleaciones magnéticas de hierro con cobalto, silicio y manganeso. Por ejemplo, la aleación magnética de hierro puede incluir aproximadamente del 2 % en peso al 10 % en peso de cobalto (Co), aproximadamente del 0,05 % en peso al 5 % en peso de manganeso (Mn) y aproximadamente del 0,05 % en peso al 5 % de silicio (Si). El Co mejora la inducción de saturación magnética de la aleación, pero disminuye ciertas propiedades mecánicas y es relativamente caro. El Mn y el Si son elementos relativamente baratos y la chatarra resultante de la transformación de la aleación puede utilizarse como material reciclable para muchas
50 calidades a fin de reducir los costes. Las aleaciones según las realizaciones de la invención contienen mucho menos Co que las aleaciones conocidas, como HIPERCO® 50 e HIPERCO® 27, manteniendo al mismo tiempo propiedades magnéticas, eléctricas y mecánicas adecuadas.

La aleación magnética de hierro puede incluir preferentemente entre un 2 % y un 8 % en peso de Co, entre un 2 % y un 5 % en peso de Co, entre un 5 % y un 10 % en peso de Co, entre un 5 % y un 8 % en peso de Co, o entre un 8 %

y un 10 % en peso de Co. La aleación magnética de hierro puede incluir más preferentemente aproximadamente 5 % en peso de Co, aproximadamente 8 % en peso de Co o aproximadamente 10 % en peso de Co.

La aleación magnética de hierro puede incluir preferentemente entre aproximadamente 0,05 % en peso y aproximadamente 2,70 % en peso de Mn, entre aproximadamente 0,05 % en peso y aproximadamente 2,20 % en peso de Mn, entre aproximadamente 0,05 % en peso y aproximadamente 1 % en peso de Mn, entre aproximadamente 1 % en peso y aproximadamente 5 % en peso de Mn, entre aproximadamente 1 % en peso y aproximadamente 2,70 % en peso de Mn, entre aproximadamente 1 % en peso y aproximadamente 2,20 % en peso de Mn, entre aproximadamente 2,20 % en peso y aproximadamente 5 % en peso de Mn, entre aproximadamente 2,20 % en peso y aproximadamente 2,70 % en peso de Mn, o entre aproximadamente 2,70 % en peso y aproximadamente 5 % en peso de Mn. La aleación magnética de hierro puede incluir más preferentemente aproximadamente 1,0 % en peso de Mn, aproximadamente 2,2 % en peso de Mn, o aproximadamente 2,7 % en peso de Mn.

La aleación magnética de hierro puede incluir preferentemente entre aproximadamente 0,05 % en peso y aproximadamente 2,3 % en peso de Si, entre aproximadamente 0,05 % en peso y aproximadamente 1,3 % en peso de Si, entre aproximadamente 1,3 % en peso y aproximadamente 5 % en peso de Si, entre aproximadamente 1,3 % en peso y aproximadamente 2,3 % en peso de Si, o entre aproximadamente 2,3 % en peso y aproximadamente 5 % en peso de Si. La aleación magnética de hierro puede incluir más preferentemente aproximadamente 1,3 % en peso de Si o aproximadamente 2,3 % en peso de Si.

Una aleación magnética de hierro preferente según las realizaciones de la invención incluye aproximadamente 10 % en peso de Co, aproximadamente 2,7 % en peso de Mn y aproximadamente 1,3 % en peso de Si. Otra aleación magnética de hierro preferente según las realizaciones de la invención incluye aproximadamente 8 % en peso de Co, aproximadamente 2,2 % en peso de Mn y aproximadamente 1,3 % en peso de Si. Otra aleación magnética de hierro preferente según las realizaciones de la invención incluye aproximadamente 5 % en peso de Co, aproximadamente 2,2 % en peso de Mn y aproximadamente 1,3 % en peso de Si. Otra aleación magnética de hierro preferente según las realizaciones de la invención incluye aproximadamente 5 % en peso de Co, aproximadamente 1 % en peso de Mn y aproximadamente 2,3 % en peso de Si.

La aleación magnética de hierro puede incluir cantidades de otros elementos de aleación adecuados, como cromo, vanadio, níquel, niobio y carbono. En otra realización ejemplar, la aleación magnética de hierro puede incluir hasta aproximadamente 3 % en peso de cromo, hasta aproximadamente 2 % en peso de vanadio, hasta aproximadamente 1 % en peso de níquel, hasta aproximadamente 0,05 % en peso de niobio y hasta aproximadamente 0,02 % en peso de carbono. En cada una de las realizaciones descritas anteriormente, el equilibrio de la aleación (es decir, el porcentaje de la aleación que no está compuesto por Co, Mn, Si u otros elementos de aleación adecuados) es hierro (Fe). La aleación también puede incluir otras impurezas mínimas que no afectan a las propiedades magnéticas, eléctricas y mecánicas de la aleación.

La aleación magnética de hierro que incluye los elementos de aleación descritos anteriormente puede proporcionar una aleación de fase cúbica centrada en el cuerpo, de alfa única (α), de ferrita. En una realización ejemplar, la aleación magnética de hierro es principal o sustancialmente de fase α (por ejemplo, > 95%). Preferiblemente, la aleación de hierro magnético comprende predominantemente fase α (por ejemplo, > 99%), con poca o ninguna presencia de fases secundarias, las aleaciones de fase α pueden proporcionar la ventaja de una mínima pérdida de núcleo y una ductilidad relativamente alta. Además, las aleaciones magnéticas de hierro según las realizaciones de la invención están diseñadas para proporcionar una resistividad eléctrica y unas propiedades magnéticas superiores.

Las aleaciones magnéticas de hierro según realizaciones de la invención poseen preferentemente una alta inducción de saturación magnética (B_s), o densidad de flujo, de al menos aproximadamente 20 kilogauss (kG); una baja coercitividad (H_c) de menos de aproximadamente 2 oersteds (Oe), y una alta resistividad eléctrica (ρ) de al menos 40 $\mu\Omega\text{cm}$. La saturación es el estado que se alcanza cuando un aumento del campo magnético externo aplicado (H) no puede aumentar más la magnetización del material, por lo que la densidad de flujo magnético total (B) se nivela más o menos. La saturación es una característica de los materiales ferromagnéticos. La coercitividad de un material es la intensidad del campo magnético aplicado necesaria para reducir la magnetización de ese material a cero después de que la magnetización de la muestra haya sido llevada a la saturación. Así, la coercitividad mide la resistencia de un material ferromagnético a desmagnetizarse. La coercitividad puede medirse con un analizador B-H o con un magnetómetro o coercímetro. La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca que cuantifica la fuerza con la que un determinado material se opone al flujo de la corriente eléctrica. Una baja resistividad indica un material que permite fácilmente el movimiento de la carga eléctrica.

Como puede apreciarse en los ejemplos de trabajo proporcionados a continuación, para la familia de aleaciones que tienen las concentraciones de Co, Mn y Si descritas anteriormente, B_s se incrementa por un aumento en la concentración de Co, pero se reduce por un aumento en las concentraciones de Mn y Si; H_c se incrementa por aumentos en la concentración de Co y Mn pero se reduce por un aumento en la concentración de Si; y ρ se incrementa por un aumento en la concentración de cualquiera de Si, Co y Mn. En consecuencia, las aleaciones magnéticas de hierro según las realizaciones de la invención pueden ajustarse ventajosamente a una amplia gama de propiedades magnéticas deseadas manteniendo bajos niveles de Co, reduciendo así el coste de la aleación.

Procedimiento de producción de las aleaciones

La aleación puede ser preparada, trabajada y formada en productos utilizando técnicas convencionales. Por ejemplo, los elementos de aleación pueden fundirse en aire o en una atmósfera adecuada, utilizando un horno de arco eléctrico y técnicas de fundición al vacío, como la fusión por inducción al vacío (VIM), la refundición por arco al vacío (VAR), la refundición por electroescoria (ESR), o similares. Si se desea, se puede obtener una mayor pureza o una mejor estructura de grano refinando la aleación, por ejemplo, mediante ESR o VAR.

La aleación puede fundirse en forma de lingote que luego se trabaja en caliente en forma de tocho, barra, planchón o similar. La temperatura del horno puede oscilar entre aproximadamente 538°C (1.000°F) y aproximadamente 1.177°C (2.150°F), por ejemplo. Las formas pueden mecanizarse en piezas y componentes útiles, como discos, muñones y ejes para rodamientos magnéticos. Alternativamente, la aleación puede ser laminada en caliente hasta obtener un alambre, una varilla o una tira del grosor deseado. El alambre, la varilla o el fleje también pueden trabajarse en frío hasta alcanzar dimensiones de sección transversal más pequeñas, a partir de las cuales pueden mecanizarse las piezas acabadas. La aleación también puede fabricarse mediante técnicas pulvimetalúrgicas.

Para seguir afinando las propiedades de la aleación, el procedimiento debe incluir además un tratamiento térmico para optimizar la inducción de saturación, la resistividad eléctrica y los valores mecánicos. La aleación se calienta hasta una primera temperatura y luego se enfría a una velocidad determinada hasta una segunda temperatura deseada.

La temperatura, las condiciones y la duración del tratamiento térmico pueden depender de la aplicación y de las propiedades deseadas para la aleación. En un ejemplo no inventivo, la aleación o las piezas pueden ser recocidas a una temperatura de aproximadamente 1.300°F (704°C) a aproximadamente 1.652°F (900°C) durante aproximadamente 2 horas a aproximadamente 4 horas en un hidrógeno seco o al vacío. A continuación, la aleación puede enfriarse a una velocidad de aproximadamente 144°F (62°C) a aproximadamente 540°F (282°C) por hora hasta que se alcance una temperatura de aproximadamente 572°F (300°C) a aproximadamente 600°F (316°C), y luego enfriarse a cualquier velocidad adecuada. Con el aumento de la temperatura, las propiedades magnéticas pueden mejorar, mientras que el límite elástico y la resistencia a la tracción disminuyen. Puede ser preferible que la temperatura no supere los 1.652 °F (900 °C) aproximadamente, ya que las características magnéticas blandas pueden empezar a disminuir debido a la formación de una fase austénica. Las propiedades magnéticas también pueden mejorarse creando una fina capa de óxido en la superficie de la aleación. La capa de óxido superficial puede conseguirse calentando en una atmósfera que contenga oxígeno, por ejemplo, a una temperatura en el rango de aproximadamente 600°F (316°C) a aproximadamente 900°F (482°C) durante un tiempo de aproximadamente 30 a aproximadamente 60 minutos.

Ejemplos

Los siguientes ejemplos se incluyen para demostrar más claramente la naturaleza general de la invención. Estos ejemplos son ejemplares, no restrictivos, de la invención.

Se preparó una serie de muestras que incluían diversos niveles de Co, Mn y Si mediante colada continua en un horno VIM para formar lingotes de 35 libras (16 kg), que posteriormente se forjaron en caliente en barras cuadradas de 2 pulgadas (5 cm). La composición química de cada muestra se presenta en la Tabla 1. Cada uno de los valores de la Tabla 1 está en porcentaje de peso. Para cada muestra, el equilibrio de la aleación es sustancialmente Fe. Las muestras se agruparon en tres series con distintas concentraciones de Co: una primera serie con aproximadamente 10 % en peso de Co (muestras 1-3), una segunda serie con aproximadamente 8 % en peso de Co (muestras 4-8) y una tercera serie con aproximadamente 5 % en peso de Co (muestras 9-13). La muestra 14 se preparó sin cobalto como control y corresponde aproximadamente al Silicon Core Iron de Carpenter.

TABLA 1

Muestra	Co	Mn	Si	Cr	C	P	S	Ni	Mo
1	10,00	2,71	0,25	0,09	<0,001	<0,005	0,0012	<0,01	<0,01
2	10,00	2,73	0,75	0,09	<0,001	<0,005	0,0013	<0,01	<0,01
3	9,98	2,73	1,23	0,09	<0,001	<0,005	0,0011	<0,01	<0,01
4	8,00	2,70	0,26	0,29	<0,001	<0,005	0,0012	<0,01	<0,01
5	8,00	2,21	0,26	0,29	<0,001	<0,005	0,0012	<0,01	<0,01

ES 2 886 802 T3

Muestra	Co	Mn	Si	Cr	C	P	S	Ni	Mo
6	7,97	2,22	0,74	0,29	<0,002	<0,005	0,0012	<0,01	<0,01
7	7,99	2,22	1,25	0,29	<0,001	<0,005	0,0011	<0,01	<0,01
8	7,97	1,70	0,26	0,29	<0,001	<0,005	0,0010	<0,01	<0,01
9	5,05	2,66	0,21	0,28	0,011	<0,005	0,0015	<0,01	<0,01
10	5,00	2,21	0,26	0,29	<0,001	<0,005	0,0013	<0,01	<0,01
11	4,98	2,22	0,75	0,29	<0,001	<0,005	0,0012	<0,01	<0,01
12	4,97	2,21	1,32	0,29	<0,001	<0,005	0,0013	<0,01	<0,01
13	4,99	1,03	2,31	0,29	<0,001	<0,005	0,0010	<0,01	<0,01
14	0,02	0,22	2,48	<0,01	0,002	<0,005	0,0007	<0,01	<0,01

Cada barra cuadrada de 5 cm (2 pulgadas) fue luego procesada por dos rutas de procesamiento diferentes. En primer lugar, una porción de cada barra cuadrada de 5 cm (2 pulgadas) se sometió a un forjado en caliente posterior para producir una barra cuadrada de 1,9 cm (0,75 pulgadas), seguida de un recocido para mejorar las propiedades magnéticas. Cada barra fue recocida en hidrógeno seco (H₂) a 1.180°C (2.156°F), enfriada a una velocidad de 93°C (200°F) por hora hasta 699°C (1.290°F) y mantenida a 699°C (1.290°F) durante 24 horas. A continuación, se caracterizó cada barra en función de la coercitividad (H_c), la inducción magnética a 250 Oe (B₂₅₀), la saturación de la inducción magnética (B_s), la resistividad eléctrica (ρ), la dureza (Rockwell B) (R_B), el límite elástico (YS), la resistencia a la tracción final (UTS), el alargamiento (EI) y la reducción de área (RA). Los resultados se recogen en la Tabla 2, en la que 1 ksi = 6,9 MPa.

TABLA 2

Muestra	H _c (Oe)	B ₂₅₀ (kG)	B _s (kG)	ρ (μΩcm)	R _B	YS (ksi)	UTS (ksi)	EI (%)	RA (%)
1	1,43 (±0,09)	20,7 (±0,1)	21,3 (±0,1)	34,8 (±0,1)	67 (±1)	33,7 (±0,1)	58,2 (±1,5)	44 (±1)	83 (±3)
2	1,30 (±0,02)	20,5 (±0,1)	21,1 (±0,1)	40,9 (±0,7)	74 (±1,5)	40,9 (±0,2)	65,2 (±0,2)	42 (±1)	81 (±4)
3	1,36 (±0,02)	20,3 (±0,1)	20,9 (±0,1)	45,3 (±0,6)	82 (±1,5)	48,9 (±0,2)	69,7 (±0,1)	40 (±1)	76 (±3)
4	1,27	20,7	21,2	32,2	64	30,2	53,2	47	84
	(±0,05)	(±0,2)	(±0,3)	(±1,4)	(±1)	(±0,1)	(±0,3)	(±1)	(±3)
5	0,97 (±0,05)	20,5 (±0,1)	21,1 (±0,1)	29,9 (±0,6)	60 (±1)	26,2 (±0,1)	52,5 (±0,2)	49 (±4)	85 (±4)
6	0,90 (±0,02)	20,3 (±0,2)	20,8 (±0,3)	38,8 (±0,6)	69 (±1)	35,2 (±0,1)	60,3 (±0,1)	45 (±1)	85 (±1)
7	1,00 (±0,01)	20,6 (±0,3)	21,1 (±0,3)	43 (±0,5)	76 (±3)	44,6 (±0,2)	67,5 (±0,1)	43 (±1)	81 (±1)

Muestra	H _c (Oe)	B ₂₅₀ (kG)	B _s (kG)	ρ (μΩcm)	R _B	YS (ksi)	UTS (ksi)	EI (%)	RA (%)
8	0,79 (±0,05)	20,7 (±0,2)	21,3 (±0,2)	28,7 (±0,6)	55 (±1)	22,6 (±0,1)	49,2 (±0,1)	51 (±1)	83 (±2)
9	1,12 (±0,05)	19,8 (±0,2)	20,4 (±0,2)	29,4 (±0,5)	57 (±2)	23,0 (±0,1)	52,1 (±0,4)	48 (±1)	84 (±2)
10	0,84 (±0,02)	20,2 (±0,1)	20,8 (±0,1)	28,5 (±1,1)	51 (±1)	25,3 (±0,9)	50,8 (±0,1)	48 (±2)	86 (±3)
11	0,84 (±0,02)	20,0 (±0,1)	20,6 (±0,1)	38,4 (±0,5)	63 (±1)	33,4 (±0,7)	56,2 (±0,1)	46 (±1)	83 (±6)
12	0,73 (±0,03)	19,8 (±0,1)	20,3 (±0,1)	42,2 (±0,5)	72 (±1)	39,8 (±0,9)	63,8 (±0,1)	44 (±1)	84 (±1)
13	0,35 (±0,01)	19,8 (±0,1)	20,4 (±0,1)	48,1 (±1,1)	81 (±2)	44,9 (±0,1)	68,2 (±0,5)	32 (±3)	51 (±7)
14	0,42 (±0,02)	19,8 (±0,1)	20,3 (±0,1)	39,2 (±0,7)	78 (±2)	37,6 (±0,1)	53,9 (±0,1)	34 (±3)	68 (±2)

Las FIGS. 1A-1C son gráficos que representan el H_c, B_s y p para cada serie de muestras. FIG. 1A representa la primera serie con aproximadamente 10 % en peso de Co (muestras 1-3), la FIG. 1B representa la segunda serie con aproximadamente 8 % en peso de Co (muestras 4-8), y la FIG. 1C representa la tercera serie con aproximadamente 5 % en peso de Co (muestras 9-13). En cada figura, el tamaño de cada burbuja es proporcional a su coercitividad y las muestras respectivas se comparan también con dos aleaciones, HIPERCO® 27 de Carpenter y la muestra de control 14, que corresponde aproximadamente al hierro con núcleo de silicio, también de Carpenter. El HIPERCO® 27 tiene un B_s de aproximadamente 20,0 kG y un H_c de aproximadamente 1,7 a aproximadamente 3,0 Oe, pero sólo un p de 19 μΩcm, no cumpliendo las propiedades deseadas de un B_s mayor de 20 kG, un p mayor de 40 μΩcm, y un H_c menor de 2 Oe. Por el contrario, la Muestra de Control 14 tiene una p de 40 μΩcm y una H_c de 0,7 Oe, pero sólo una B_s de 19,8 kG, que tampoco cumple las propiedades deseadas.

La FIG. 1A representa las tres muestras (Muestras 1-3) que tienen aproximadamente 10 % en peso de Co en comparación con HIPERCO® 27 y la Muestra de Control 14. Cada una de las tres muestras tenía un B_s entre Hiperco® 27 y la muestra de control 14, y mayor que el B_s deseado de 20 kG. Cada una de las tres muestras tenía también un H_c entre HIPERCO® 27 y la muestra de control 14, y cumplía el H_c deseado de menos de 2,0 Oe. Sin embargo, sólo la muestra 3 (Co = 9,98 % en peso, Mn = 2,73 % en peso y Si = 1,23 % en peso) tuvo la p deseada de más de 40 μΩcm. Entre las aleaciones de esta serie, un aumento del contenido de Si (manteniéndose constante la composición de los demás elementos) aumenta p, disminuye H_c y disminuye B_s.

La FIG. 1B representa las cinco muestras (muestras 4-8) que tienen aproximadamente un 8 % en peso de Co en comparación con HIPERCO® 27 y la muestra de control 14. Cada una de las tres muestras tenía un B_s entre el HIPERCO® 27 y la muestra de control 14, y mayor que el B_s deseado de 20 kG. Cada una de las tres muestras tenía también un H_c entre HIPERCO® 27 y la muestra de control 14, y cumplía el H_c deseado menor de 2,0 Oe. Sin embargo, sólo la muestra 7 (Co = 7,99 % en peso, Mn = 2,22 % en peso y Si = 1,25 % en peso) tuvo la p deseada de más de 40 μΩcm. Como puede observarse al comparar estas aleaciones con la primera serie de aleaciones, una disminución del contenido de Mn (manteniéndose constante la composición de los demás elementos) disminuye p y H_c, pero sólo tiene un efecto marginal sobre B_s.

La FIG. 1C representa las cinco muestras (muestras 9-13) que tienen aproximadamente un 5 % en peso de Co en comparación con HIPERCO® 27 y la muestra de control 14. Cada una de las tres muestras tenía un B_s entre el HIPERCO® 27 y la muestra de control 14, y mayor que el B_s deseado de 20 kG. Cada una de las tres muestras tenía también un H_c entre HIPERCO® 27 y la muestra de control 14, y cumplía el H_c deseado de menor de 2,0 Oe. Sin embargo, sólo la muestra 12 (Co = 4,97 % en peso, Mn = 2,21 % en peso y Si = 1,32 % en peso) y la muestra 13 (Co = 4,99 % en peso, Mn = 1,03 % en peso y Si = 2,31 % en peso) tuvieron la p deseada de más de 40 μΩcm.

Se realizó un análisis de regresión para determinar la relación entre las concentraciones de Co, Mn y Si en las muestras y sus efectos sobre B_s, H_c y p. Estas relaciones se expresan mediante las siguientes ecuaciones, en la que XCo es la concentración de Co, XMn es la concentración de Mn y XSi es la concentración de Si

$$B_s = 20,7 + 0,153 \cdot X_{Co} - 0,322 \cdot X_{Mn} - 0,318 \cdot X_{Si} \quad (R^2 = 0,86; p = 0,00) \text{ (Formula 1);}$$

$$H_c = -0,209 + 0,062 \cdot X_{Co} + 0,317 \cdot X_{Mn} - 0,096 \cdot X_{Si} \quad (R^2 = 0,86; p = 0,00) \text{ (Formula 2);}$$

$$p = 13,4 + 0,557 \cdot X_{Co} + 0,451 \cdot X_{Mn} + 12,2 \cdot X_{Si} \quad (R^2 = 0,86; p = 0,00) \text{ (Formula 3).}$$

A partir de estas ecuaciones, se puede determinar que, para la gama de aleaciones examinadas, un aumento de la concentración de Co tiene un efecto positivo sobre B_s , mientras que los aumentos de la concentración de Mn y de Si tienen efectos negativos, y los efectos negativos de la concentración de Mn y de Si sobre B_s son aproximadamente iguales y son aproximadamente el doble del efecto positivo de la concentración de Si. También se puede determinar que el aumento de la concentración de Co aumenta la H_c , el aumento de la concentración de Mn aumenta la H_c y el aumento de la concentración de Si disminuye la H_c . Los efectos del aumento de las concentraciones de Co y Si en H_c son pequeños en relación con el efecto del aumento de la concentración de Mn. También se puede determinar que el aumento de cualquiera de las concentraciones de Co, Mn o Si aumenta p , pero que el efecto de la concentración de Si es aproximadamente 2,7 veces mayor que el efecto de la concentración de Mn y aproximadamente 22 veces mayor que el efecto de la concentración de Co.

Las FIGS. 2A-2C representan varias propiedades mecánicas de cada serie de aleaciones (es decir, aproximadamente 10 % en peso de Co, aproximadamente 8 % en peso de Co y aproximadamente 5 % en peso de Co) en comparación con la muestra de control 14 (es decir, la muestra de control sustancialmente libre de Co), incluido el límite elástico (FIG. 2A), la resistencia a la tracción (FIG. 2B), y la elongación (FIG. 2C). Para cada serie, las propiedades mecánicas son adecuadas para las aplicaciones de magnetismo suave. En general, dentro de una serie, un aumento de la concentración de Si conduce a un aumento de la resistencia, medida por el límite elástico y la resistencia a la tracción, y una disminución marginal de la ductilidad, medida por el alargamiento, mientras que un aumento de Mn conduce a un aumento marginal de la resistencia y una disminución de la ductilidad.

La FIG. 3A representa los datos de difracción de rayos X para cuatro aleaciones ejemplares, concretamente las muestras 3, 7, 12 y 13. Los datos de difracción de rayos X de cada aleación indican que se trata de aleaciones monofásicas y que los picos de difracción (110), (200), (211) y (220) corresponden a una ferrita o fase α (BCC). Micrografías ópticas de las muestras [12] (FIG. 3B) y [13] (FIG. 3C) confirman la presencia de una sola fase.

En la segunda ruta de procesamiento, una porción de cada barra cuadrada de 5 cm (2 pulgadas) se calentó a 1.204°C (2.200°F) y se laminó en caliente hasta obtener una tira de 0,64 cm (0,25 pulgadas) de espesor. A continuación, la tira se sometió a un chorro de arena para eliminar las costras y se laminó en frío hasta alcanzar un grosor de 0,080 pulgadas (0,2 cm), se recoció a 1.300 °F (704 °C) durante 2 horas en H2 seco y se volvió a laminar en frío hasta alcanzar un grosor de aproximadamente 0,045 pulgadas (0,11 cm). A continuación, se estamparon los anillos a partir de la tira y se recocieron en hidrógeno seco (H2) a 2.156 °F (1.180 °C), se enfriaron a una velocidad de 200 °F (93 °C) por hora hasta alcanzar los 1.290 °F (699 °C) y se mantuvieron a 1.290 °F (699 °C) durante 24 horas. A continuación, se caracterizó cada anillo en función de la coercitividad (H_c), la inducción magnética a 200 Oe (B_{200}) y la pérdida en el núcleo (P_c) (medida a 60 Hz y 15kG). Los resultados se recogen en la Tabla 3, donde 1 W/lb = 2,2 W/kg.

TABLA 3

Muestra	H_c (Oe)	B_{200} (kG)	P_c (W/lb)
1	1,25 ($\pm 0,01$)	20,5 ($\pm 0,4$)	4,02 ($\pm 0,01$)
2	1,22 ($\pm 0,01$)	19,6 ($\pm 0,7$)	4,36 ($\pm 0,01$)
3	1,16 ($\pm 0,01$)	19,7 ($\pm 0,1$)	3,99 ($\pm 0,01$)
4	1,15 ($\pm 0,01$)	20,8 ($\pm 0,2$)	4,22 ($\pm 0,01$)
5	0,91 ($\pm 0,01$)	19,1 ($\pm 0,1$)	4,94 ($\pm 0,02$)
6	0,98 ($\pm 0,01$)	20,7 ($\pm 0,1$)	4,81 ($\pm 0,01$)

Muestra	Hc (Oe)	B200 (kG)	Pc(W/lb)
7	0,80 ($\pm 0,01$)	20,7 ($\pm 0,1$)	4,62 ($\pm 0,01$)
8	0,79 ($\pm 0,01$)	20,6 ($\pm 0,1$)	5,30 ($\pm 0,01$)
9	0,99 ($\pm 0,01$)	19,8 ($\pm 0,1$)	6,03 ($\pm 0,01$)
10	0,74 ($\pm 0,01$)	20,6 ($\pm 0,1$)	4,37 ($\pm 0,01$)
11	0,74 ($\pm 0,01$)	19,9 ($\pm 0,1$)	4,31 ($\pm 0,01$)
12	0,60 ($\pm 0,01$)	20,2 ($\pm 0,1$)	4,18 ($\pm 0,01$)
13	0,26 ($\pm 0,01$)	19,8 ($\pm 0,3$)	4,55 ($\pm 0,01$)
14	0,39 ($\pm 0,01$)	19,9 ($\pm 1,0$)	3,75 ($\pm 0,01$)

La FIG. 4 representa la Pc de tres muestras (Muestras 3, 7 y 12) que cumplen con las propiedades deseadas (B_s mayor de 20 kG, ρ mayor de 40 $\mu\Omega\text{cm}$ y Hc de menos de 2 Oe) antes de ser procesadas en tiras en comparación con las tiras de HIPERCO® 27 y la Muestra de Control 14. Como puede apreciarse en la FIG. 4, las muestras 3, 7 y 12 tienen cada una un valor Pc similar al de la muestra de control 14 sin cobalto, pero inferior al valor Pc del HIPERCO® 27.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de preparación de una aleación magnética de hierro que comprende:
 hierro (Fe);
 2 en peso.% $\leq$ cobalto (Co) $\leq$ 10 en peso.%;
5 0.05 en peso.% $\leq$ manganeso (Mn) $\leq$ 5 en peso.%;
 0.05 en peso.% $\leq$ silicio (Si) $\leq$ 5 en peso.%; que comprende un procedimiento de tratamiento térmico final tras el trabajo en caliente o en frío y la conformación de dicha aleación que comprende las siguientes etapas:
 - recocido a 1180°C en hidrógeno seco;
10 - enfriamiento a 93°C por hora hasta alcanzar una temperatura de 699°C, y luego
 - que se mantiene durante 24 horas.
2. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de la reivindicación 1, en el que la aleación comprende principalmente una única fase alfa (α).
- 15 3. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de hierro de la reivindicación 1, en el que la aleación comprende además uno o más de:
 cromo hasta el 3 % en peso;
 vanadio hasta el 2 % en peso;
 níquel hasta el 1 % en peso;
 niobio hasta el 0,05 % en peso; y
20 carbono hasta el 0,02 % en peso.
4. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de hierro de la reivindicación 2, en el que la aleación comprende al menos el 95% de la fase alfa.
- 25 5. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de hierro de la reivindicación 2, en el que la aleación comprende al menos el 99% de la fase alfa.
6. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de hierro de la reivindicación 1, en el que la aleación comprende 5 % en peso de Co, 2,2 % en peso de Mn y 1,3 % en peso de Si.
7. El procedimiento de preparación de la aleación magnética de hierro de la reivindicación 1, en el que la aleación comprende 5 % en peso de Co, 1,0 % en peso de Mn y 2,3 % en peso de Si.

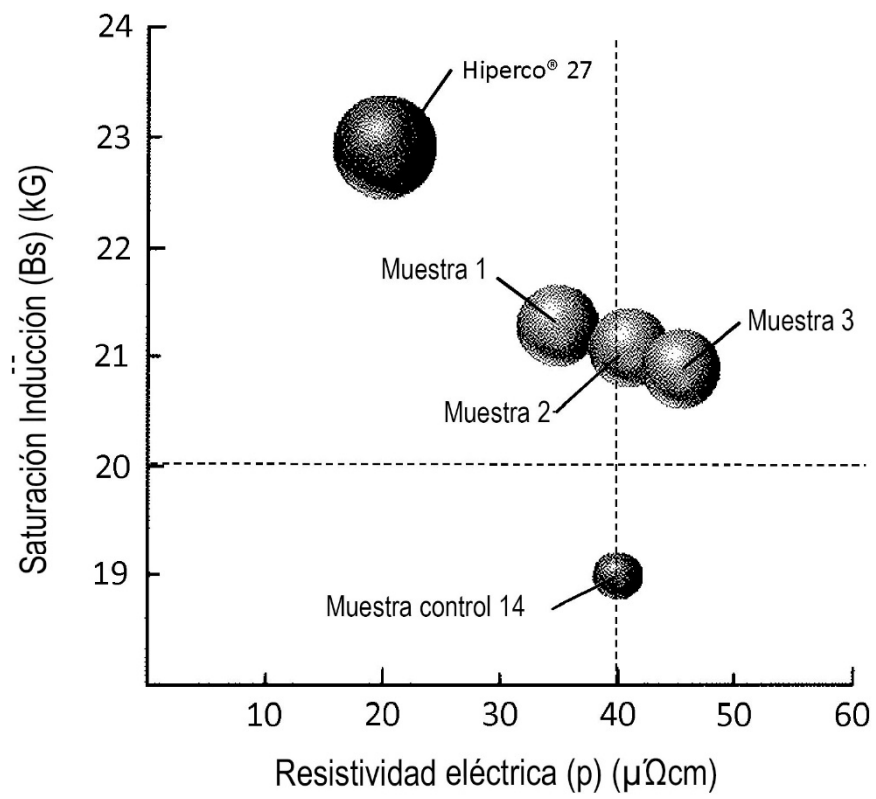


FIG. 1A

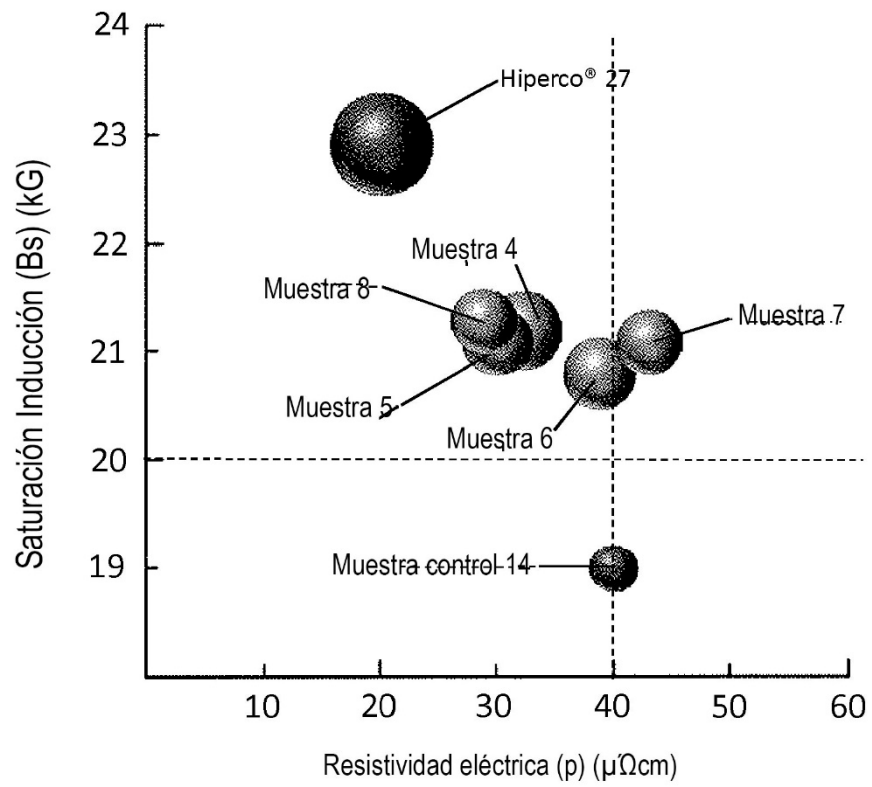


FIG. 1B

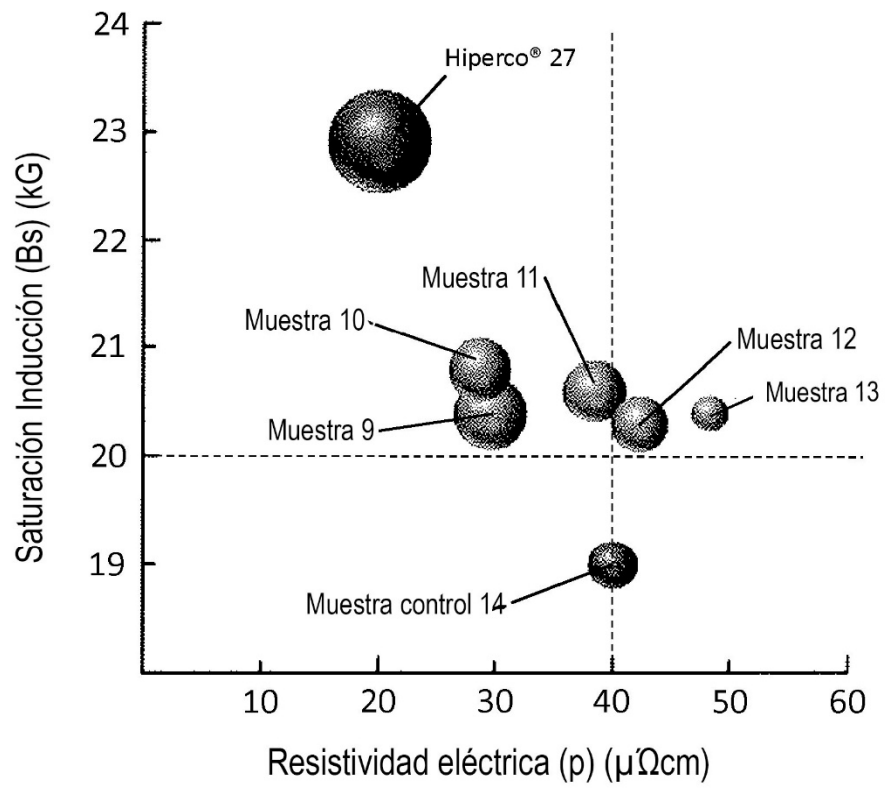


FIG. 1C

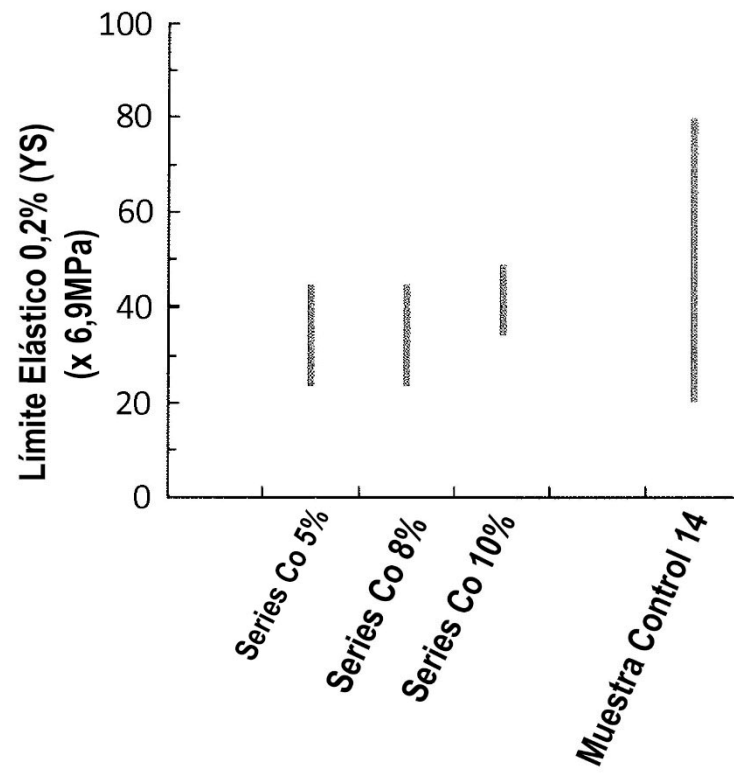


FIG. 2A

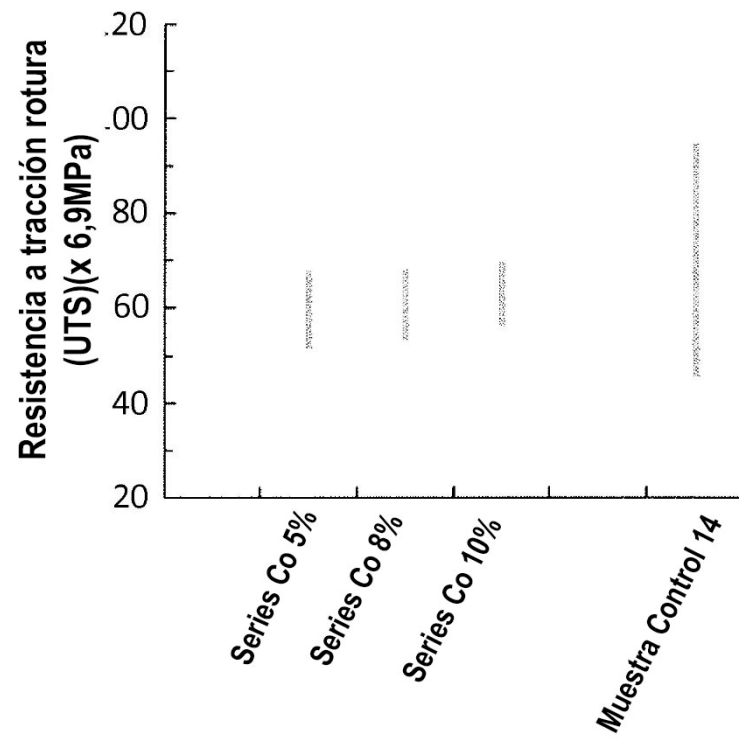


FIG. 2B

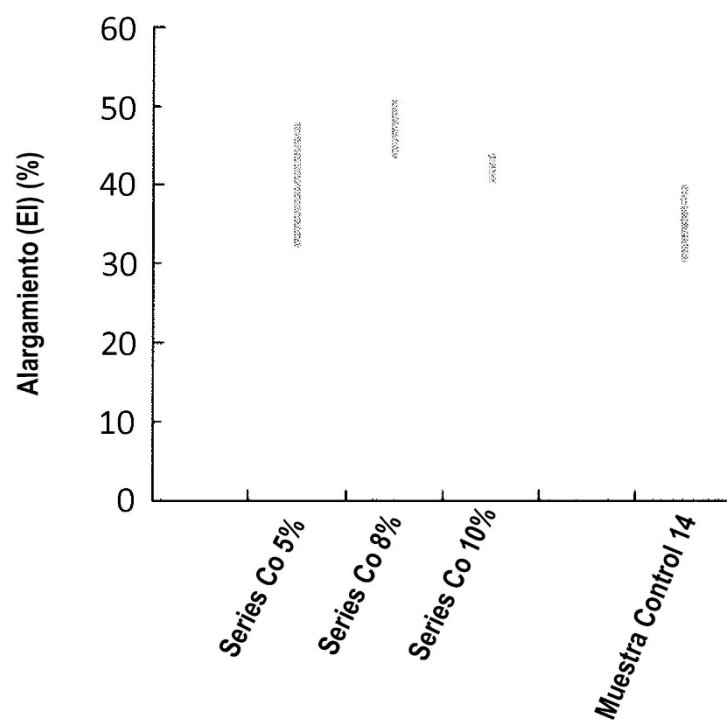


FIG. 2C

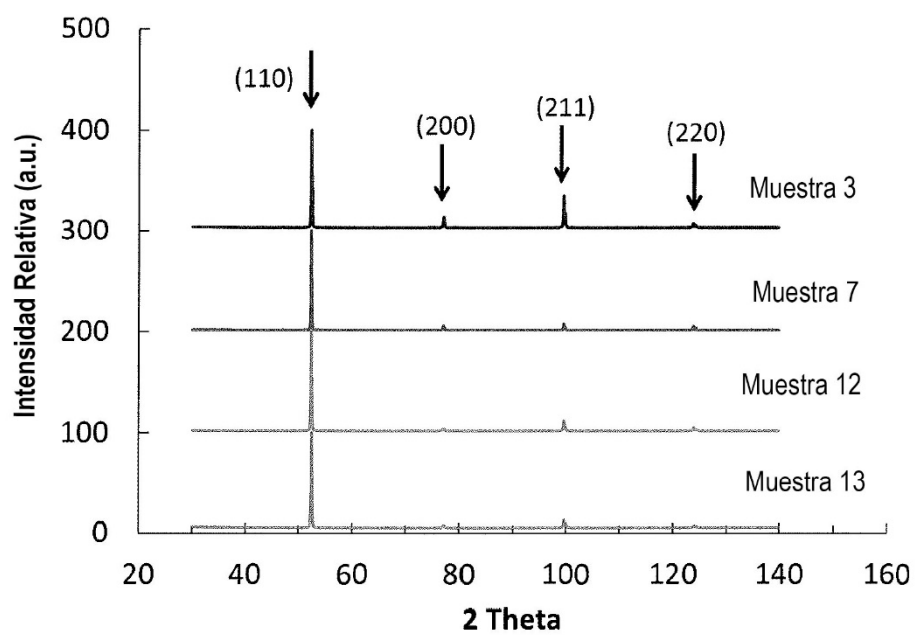


FIG. 3A

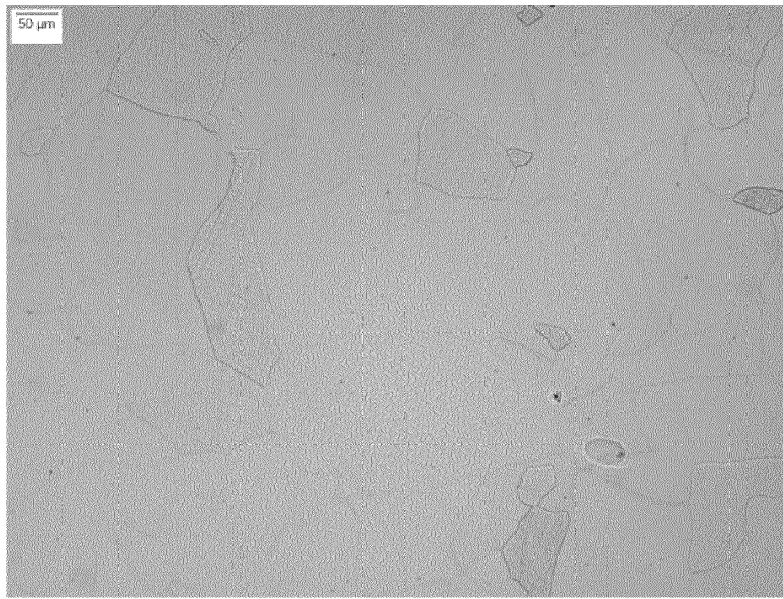


FIG. 3B

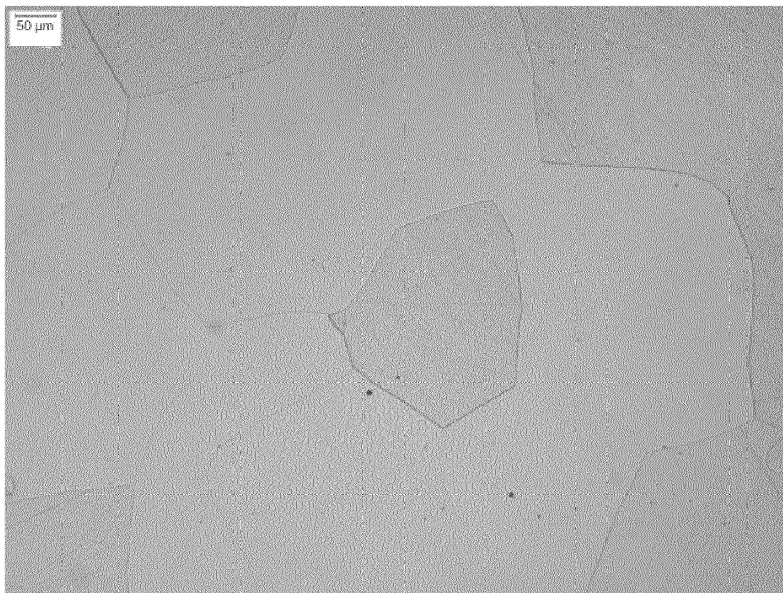


FIG. 3C

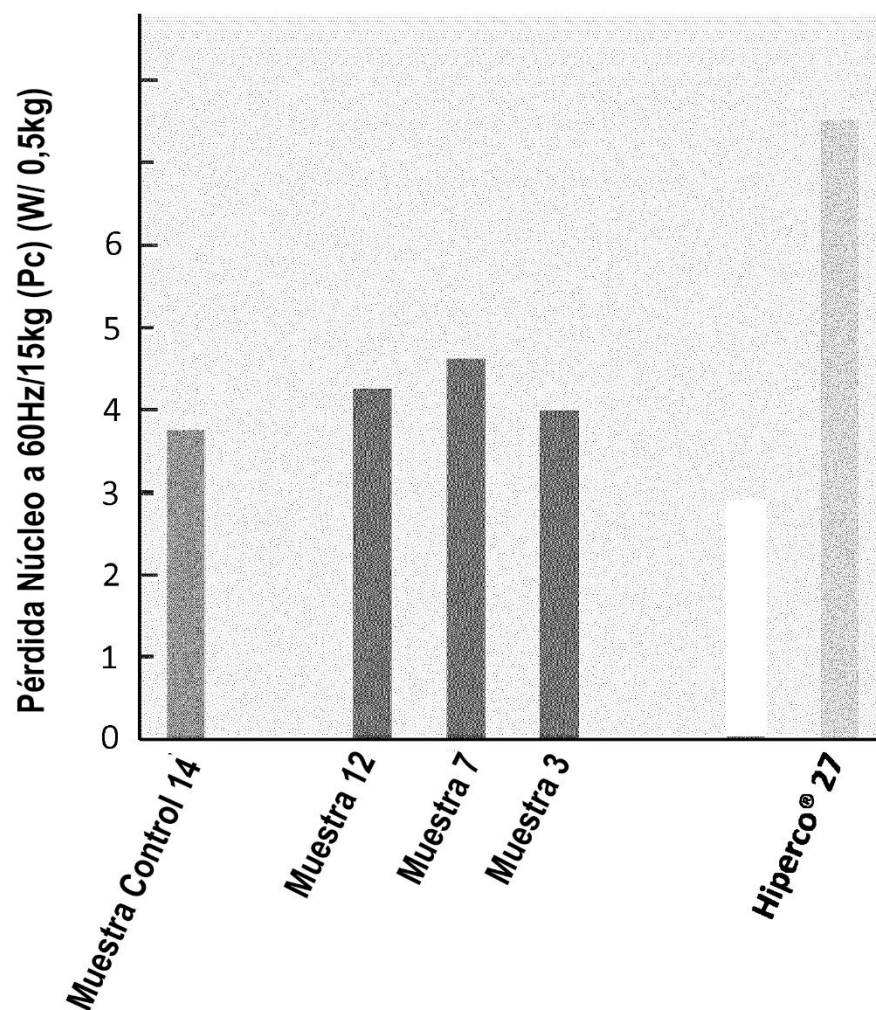


FIG. 4