

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 934 249**

51 Int. Cl.:

H01B 1/02 (2006.01)

C22C 21/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.07.2017 PCT/CA2017/050868**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.01.2018 WO18014128**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.07.2017 E 17830151 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2022 EP 3488446**

54 Título: **Aleaciones de aluminio conductoras que tienen resistencia a la fluencia mejorada**

30 Prioridad:

21.07.2016 US 201662365020 P

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

20.02.2023

73 Titular/es:

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
(100.0%)
555 Boul. de l'Université
Chicoutimi, Québec G7H 2B1, CA**

72 Inventor/es:

**CHEN, XIAO-GRANT;
PAN, LEI;
LIU, KUN;
MALTAIS, ALEXANDRE y
BOURASSA, BRUNO**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 934 249 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 de aluminio conductoras que tienen resistencia a la fluencia mejorada

Campo tecnológico

La presente descripción se refiere a aleaciones de aluminio que se pueden usar como material conductor eléctrico.

5 Antecedentes

A medida que la economía se ha desarrollado en las últimas décadas, la demanda de materiales conductores eléctricos ha aumentado significativamente. Las aleaciones de aluminio 8xxx conductoras ofrecen ventajas significativas, tales como baja densidad, alta relación entre conductividad y peso y bajo coste en comparación con los conductores de cobre. Reemplazan progresivamente a la aleación de cobre conductora en la transmisión y distribución aérea. Para una amplia aplicación de conductores de aluminio, es necesario que satisfagan los requisitos generales de propiedades en la industria eléctrica, en particular la conductividad eléctrica, la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia. En consecuencia, se han dedicado esfuerzos considerables para desarrollar las aleaciones de aluminio conductoras con altas propiedades integrales.

La aleación de aleación de aluminio comercialmente pura puede crear una disolución sólida o fases individuales que mejoran en gran medida la resistencia a la tracción debido al endurecimiento por disolución sólida y al endurecimiento por precipitación. Sin embargo, la conductividad eléctrica puede disminuir debido a la mayor dispersión de electrones libres en los átomos de soluto y precipitados. Para aplicaciones eléctricas, es un desafío encontrar una combinación favorable de alta conductividad eléctrica con propiedades mecánicas mejoradas en el diseño y desarrollo de la aleación.

Además, la propiedad de fluencia es una de las propiedades más importantes requeridas en las aleaciones de aluminio conductoras. Debido al efecto Joule se incrementa la temperatura en el conductor de aluminio y se necesita resistencia a la fluencia para evitar deformaciones a largo plazo.

Sería deseable obtener una aleación de aluminio conductora que tuviera una resistencia a la fluencia mejorada a temperaturas relativamente bajas sin disminuir sustancialmente su conductividad eléctrica. Como alternativa o en combinación, también sería deseable obtener una aleación de aluminio conductora que tuviera propiedades de moldeo mejoradas.

El documento US 2014/0020796 A1 describe un conductor de aleación de aluminio que tiene una composición de aleación que consiste en Fe: de 0.01 a 0.4 por ciento en masa, Mg: de 0.04 a 0.3 por ciento en masa, Si: de 0.02 a 0.3 por ciento en masa y Cu: de 0.1 a 0.5 por ciento en masa, siendo el resto Al e impurezas inevitables.

El documento US 2013/0126055 A1 describe un conductor de aleación de aluminio, que consiste en: de 0.01 a 0.4 por ciento en masa de Fe, de 0.1 a 0.5 por ciento en masa de Cu, de 0.04 a 0.3 por ciento en masa de Mg, de 0.02 a 0.3 por ciento en masa de Si y de 0.001 a 0.01 por ciento en masa en total de Ti y V, siendo el resto Al e impurezas inevitables.

El documento US 3 668 019 describe un método para producir cable conductor eléctrico que comprende: (1) proporcionar un cuerpo compuesto de una aleación base de aluminio que consiste esencialmente en de 0.04 a 0.3% de Mg, hasta 0.5% de Cu, siendo el resto aluminio con los siguientes límites máximos de otros elementos: 0.10% de Si, 0.25% de Fe, 0.04% de B, 0.04% de Ga, 0.03% de Zn, 0.01% de Sn, 0.01% de Ni, 0.005% de Mn, 0.005% de Cr, 0.003% de Ti, 0.003% de V y 0.003% de Zr, no excediendo la combinación total de todos los elementos que no sean Al, Mg y Cu de 0.4%, (2) fabricar con dicho cuerpo dicho cable conductor usando procedimientos de trabajo de metales que le confieren un temple severamente endurecido por deformación, equivalente a una reducción en frío que constituye al menos el 90% del área de la sección transversal del cuerpo antes de ser sometido a dichos procedimientos de trabajo del metal.

Estos 3 documentos no dicen nada sobre aleaciones que tienen 0.02-0.025 por ciento en masa de Mg y no proporcionan enseñanza para reducir el contenido de Mg, y mucho menos determinan el intervalo ventajoso de 0.02-0.025 de Mg.

Breve resumen

La presente descripción se refiere a aleaciones de aluminio conductoras que, una vez moldeadas, tienen una resistencia a la fluencia mejorada en comparación con las aleaciones de aluminio conductoras correspondientes que tienen menos de 0.1 de Mg (en porcentaje en peso).

La presente invención se refiere a una aleación de aluminio conductora que tiene una mayor resistencia a la fluencia. La aleación de aluminio conductora comprende, en porcentaje en peso:

- 50 hasta 0.10 de Si;
- hasta 0.5 de Fe;

hasta 0.30 de Cu;

entre 0.02 y 0.025 de Mg;

hasta 0.04 de B;

y siendo el resto aluminio e impurezas inevitables.

5 En una realización, la aleación de aluminio conductora comprende hasta 0.05 de Si. En otra realización, la aleación de aluminio conductora comprende entre 0.3 y 0.5 de Fe. En otra realización más, la aleación de aluminio conductora comprende entre 0.15 y 0.30 de Cu, por ejemplo, hasta 0.18 de Cu. En otra realización más, la aleación de aluminio comprende entre 0.001 y 0.04 de B. En otra realización, la aleación de aluminio tiene una velocidad de fluencia secundaria de $1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ o menos cuando se mide a 100°C bajo una carga de 69 MPa.

10 Se describe una varilla que comprende la aleación de aluminio conductora descrita aquí que no es parte de la invención.

Se describe como no parte de la invención un producto de moldeo de aluminio que comprende la aleación de aluminio conductora descrita aquí. El producto de moldeo de aluminio puede ser, por ejemplo, un cable.

15 Se describe como no parte de la invención un procedimiento para mejorar la resistencia a la fluencia de un producto de aluminio que comprende una aleación de aluminio conductora modificada en comparación con un producto de aluminio correspondiente que comprende una primera aleación de aluminio conductora. En términos generales, el procedimiento comprende combinar Mg con la primera aleación de aluminio conductora para proporcionar la aleación de aluminio conductora modificada. La primera aleación de aluminio conductora comprende, en porcentaje en peso:

hasta alrededor de 0.10 de Si;

hasta alrededor de 0.5 de Fe;

20 hasta alrededor de 0.30 de Cu;

hasta alrededor de 0.04 de B;

y siendo el resto aluminio e impurezas inevitables.

25 En el procedimiento, la aleación de aluminio modificada comprende entre alrededor de 0.02 y alrededor de 0.1 de Mg. La aleación de aluminio conductora modificada comprende hasta alrededor de 0.05 de Si. La aleación de aluminio conductora modificada comprende entre alrededor de 0.3 y alrededor de 0.5 de Fe. La aleación de aluminio conductora modificada comprende entre alrededor de 0.15 y alrededor de 0.30 de Cu, tal como, por ejemplo, hasta alrededor de 0.18 de Cu. La aleación de aluminio conductora modificada comprende hasta alrededor de 0.052 de Mg. La aleación de aluminio conductora modificada comprende hasta alrededor de 0.025 Mg. La aleación de aluminio conductora modificada comprende entre alrededor de 0.001 y alrededor de 0.04 de B. La aleación de aluminio conductora modificada tiene una velocidad de fluencia secundaria de $1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ o menos cuando se mide a 100°C bajo una carga de 69 MPa.

30 Se describe como no parte de la invención una aleación de aluminio conductora (también denominada aleación de aluminio modificada) obtenible u obtenida mediante el procedimiento descrito aquí. La aleación de aluminio conductora puede tener forma de varilla.

35 La presente invención se refiere a un procedimiento para fabricar un producto de aluminio que comprende una aleación de aluminio conductora, comprendiendo el procedimiento la etapa de trabajar la aleación de aluminio conductora descrita aquí.

Se describe como no parte de la invención un producto de aluminio obtenible u obtenido por el procedimiento descrito aquí. El producto de aluminio puede ser un cable.

40 En el contexto de la presente descripción, la expresión "alrededor de" quiere decir que el valor numérico mencionado es parte de un intervalo que varía dentro del error experimental estándar.

Breve descripción de los dibujos

Habiendo descrito así de manera general la naturaleza de la invención, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos, que muestran a modo de ilustración, una realización preferida de la misma, y en los que:

45 **Las figuras de 1A a D** proporcionan las micrográficas ópticas que muestran la distribución de partículas de las aleaciones: **(A)** Al-0.3Fe, **(B)** Al-0.3Fe-0.29Cu, **(C)** Al-0.7Fe y **(D)** Al-0.7Fe-0.18Cu-0.1Mg, que muestran finas partículas intermetálicas ricas en Fe distribuidas a lo largo de la dirección de extrusión (ED).

Las figuras 2A y B ilustran la evolución del tamaño de subgrano (en μm) con el aumento de contenido de **(A)** Cu (■ = Al-0.3Fe-Cu; ● = Al-0.5Fe-Cu; ▲ = Al-0.7Fe-Cu) y **(B)** Mg (■ = Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg; ● = Al-0.5Fe-0.18Cu-Mg; ▲ = Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg) de diferentes aleaciones.

Las figuras 3A y B proporcionan las influencias individuales de los elementos aleantes seleccionados sobre la conductividad eléctrica (CE en % International Annealed Copper Standard (Estándar Internacional del Cobre Recocido), IACS): **(A)** Cu (■ = Al-0.3Fe-Cu; ● = Al-0.5Fe-Cu; ▲ = Al-0.7Fe-Cu) y **(B)** Mg (■ = Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg; ● = Al-0.5Fe-0.18Cu-Mg; ▲ = Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg).

5 **La figura 4** proporciona una correlación entre la CE calculada y la medida experimental (en % IACS) para las aleaciones Al-0.3Fe-Cu-Mg (■), Al-0.5Fe-Cu-Mg (●) y Al-0.7Fe-Cu-Mg (▲).

10 **Las figuras de 5A a C** proporcionan las influencias individuales de los elementos químicos seleccionados en la resistencia máxima a la tracción (UTS en MPa): **(A)** Cu (▲ = Al-0.3Fe-Cu; ● = Al-0.5Fe-Cu; ■ = Al-0.7Fe-Cu), **(B)** Mg (■ = Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg; ● = Al-0.5Fe-0.18Cu-Mg; ▲ = Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg), y **(C)** Fe con una relación lineal (■ = Al-Fe; ● = Al-0.29Cu-Fe; ▲ = Al-0.18Cu-0.1Mg-Fe).

La figura 6 proporciona la correlación entre UTS calculada y medida experimentalmente (en MPa) para aleaciones (■ = Al-0.3Fe-Cu-Mg; ● = Al-0.5Fe-Cu-Mg; ▲ = Al-0.7Fe-Cu-Mg).

15 **La figura 7** proporciona el perfil de EC (en %IACS) y UTS (en MPa) de las aleaciones (■/⊞ = Al-0.3Fe-Cu-Mg; ●/⊕ = Al-0.5Fe-Cu-Mg; ▲/⊡ = Al-0.7Fe-Cu-Mg) con diferentes adiciones de Cu y Mg. Las flechas muestran las adiciones crecientes de Cu y Mg a sus regiones correspondientes.

Las figuras 8A y B proporcionan las curvas de deformación por fluencia compresiva típica (ϵ) **(A)** y velocidad de fluencia instantánea ($\dot{\epsilon}$) **(B)** de aleaciones Al-0.3Fe con adición de Cu (■ = Al-0.3Fe (base); ● = Al-0.3Fe-0.18Cu; ▲ = Al-0.3Fe-0.29Cu), ensayadas a 100°C y carga aplicada de 69 MPa.

20 **Las figuras 9A y B** proporcionan las curvas de deformación por fluencia compresiva típica (ϵ en %) **(A)** y velocidad de fluencia instantánea ($\dot{\epsilon}$ en s^{-1}) **(B)** de aleaciones Al-0.3Fe-0.18Cu con adición de Mg (■ = Al-0.3Fe-0.18Cu; ● = Al-0.3Fe-0.18Cu-0.025Mg; ▲ = Al-0.3Fe-0.18Cu-0.052Mg; ▼ = Al-0.3Fe-0.18Cu-0.1Mg), ensayadas a 100°C y carga aplicada de 69 MPa.

25 **Las figuras de 10A a D** proporcionan gráficas que ilustran la variación de **(A)** - **(B)** de la deformación por fluencia primaria (ϵ_p en %) y **(C)** - **(D)** velocidad de fluencia mínima ($\dot{\epsilon}_m$ en s^{-1}) al aumentar el contenido de Cu ((A) y (C) ■ = Al-0.3Fe-Cu; ● = Al-0.5Fe-Cu; ▲ = Al-0.7Fe-Cu) y al aumentar el contenido de Mg ((B) y (D) ■ = Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg; ● = Al-0.5Fe-0.18Cu-Mg; ▲ = Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg).

La figura 11 proporciona la temperatura de la barra (lingote) (en °C) en función del contenido de Fe de las aleaciones.

Descripción detallada

30 La presente descripción se refiere al uso de Mg en aleaciones de aluminio conductoras para aumentar la resistencia a la fluencia sin disminuir sustancialmente la conductividad eléctrica del producto que comprende la aleación de aluminio conductora. En algunas realizaciones, el aumento de la resistencia a la fluencia se observa a bajas temperaturas (por ejemplo, ≤ 0.4 temperatura del punto de fusión o T_m). En algunas realizaciones, las aleaciones de aluminio conductoras también pueden tener un contenido de Fe reducido que facilitará las operaciones de moldeo sin
35 disminuir sustancialmente las propiedades de resistencia del producto que comprende la aleación de aluminio conductora.

En el contexto de la presente descripción, se añade Mg, en un porcentaje en peso de entre 0.02 y 0.025 (en porcentaje en peso) a cualquier aleación de aluminio conductora para aumentar la resistencia a la fluencia de dicha aleación de aluminio conductora y sin disminuir sustancialmente la conductividad eléctrica de dicha aleación de aluminio conductora.
40 La adición de Mg va acompañada de una disminución del contenido de Fe de la aleación de aluminio conductora de la presente descripción que puede limitarse a 0.5 o incluso a 0.3 (en porcentaje en peso). Por ejemplo, se puede añadir Mg a las aleaciones forjadas de la serie 8xxx (tales como, por ejemplo, las aleaciones de aluminio de la serie 8030) y a las aleaciones forjadas de la serie 1xxx (tales como, por ejemplo, las aleaciones de aluminio de la serie 1350).

Una de las ventajas de las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción es que, una vez moldeadas, muestran una mayor resistencia a la deformación por fluencia en comparación con otra aleación de aluminio conductora que comprende menos de 0.02 Mg (en porcentaje en peso). Dado que las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción están destinadas a usarse a bajas temperaturas, este aumento en la resistencia a la fluencia se observa preferentemente a temperaturas bajas (por ejemplo, $\leq 0.4 T_m$ de la aleación de aluminio conductora). En una realización, el aumento de la resistencia a la fluencia se produce a temperaturas entre
45 de alrededor de 20°C a alrededor de 200°C o entre de alrededor de 50°C a alrededor de 150°C. Como es conocido en la técnica, la fluencia se caracteriza por tres etapas: fluencia primaria, secundaria y terciaria. Durante la fluencia primaria, las velocidades de deformación son relativamente altas, pero se reducen con el tiempo. Durante la fluencia secundaria, las velocidades de deformación son estables. Las velocidades de deformación por fluencia secundaria se usan normalmente para caracterizar la "velocidad de deformación por fluencia" de un material, tal como una aleación
50 de aluminio conductora. Durante la fluencia terciaria, se produce un estrechamiento que conduce al fallo de la aleación. La fluencia se puede determinar mediante la deformación absoluta medida o la velocidad de deformación medida. En

una realización, un producto de aluminio fabricado a partir de la aleación de aluminio conductora de la presente descripción (en comparación con un producto de aluminio correspondiente fabricado a partir de una aleación de aluminio conductora que no tiene una adición deliberada de Mg o que tiene menos de 0.02 de Mg (en porcentaje en peso)) tiene una velocidad de fluencia mínima reducida (por ejemplo, la velocidad de fluencia media durante la fluencia secundaria) o velocidad de fluencia secundaria, una deformación por fluencia a corto plazo o velocidad de fluencia primaria disminuida, una deformación por fluencia compresiva típica disminuida y/o una velocidad de fluencia instantánea disminuida. En algunas realizaciones, las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción tienen una velocidad de fluencia secundaria como máximo (por ejemplo, una velocidad de fluencia secundaria máxima) de alrededor de 1×10^{-8} /s cuando se mide a 100°C bajo una carga de 69 MPa. Las aleaciones de aluminio conductoras descritas aquí tienen como máximo 0.1 de Mg (en porcentaje en peso) para preservar la conductividad eléctrica de la aleación.

Otra ventaja de algunas de las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción es que, si comprenden 0.5 de Fe (en porcentaje en peso) o menos (como, por ejemplo, menos de 0.5 o menos de 0.3 de Fe, en porcentaje en peso), la aleación de aluminio conductora tendrá propiedades de moldeo mejoradas, por ejemplo, será más fácil y/o más rápida de moldear (en comparación con las aleaciones de aluminio conductoras correspondientes que tienen más de 0.5 de Fe, en porcentaje en peso).

Debido a que las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción están destinadas a ser usadas como material conductor eléctrico, en algunas realizaciones pueden exhibir una resistencia máxima a la tracción (UTS) entre alrededor de 115 y 145 MPa así como una conductividad eléctrica EC de al menos 58% IACS.

Las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden silicio (Si). Las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.1 de Si (en porcentaje en peso). En otra realización, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09 o 0.1 de Si (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 o 0.05 de Si (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.05 de Si (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, 0.05 de Si (en porcentaje en peso).

La aleación de aluminio de la presente descripción comprende hierro (Fe). Las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.5 de Fe (en porcentaje en peso). En otra realización adicional, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 o 0.5 de Fe (en porcentaje en peso). En otra realización adicional, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.1, 0.2, 0.3 o 0.4 de Fe (en porcentaje en peso). En otra realización adicional, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden, en porcentaje en peso, hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.1, 0.2 o 0.3 de Fe (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, las aleaciones de aluminio de la presente descripción comprenden al menos (por ejemplo, un mínimo de) 0.3 de Fe (en porcentaje en peso). En otra realización, las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden al menos 0.3 de Fe y hasta 0.4 o 0.5 de Fe, por ejemplo, entre 0.3 y 0.4 de Fe, entre 0.3 de Fe y 0.5 de Fe (en porcentaje en peso). En realizaciones en las que se prefiere mejorar las propiedades de moldeo de la aleación de aluminio conductora, la aleación de aluminio comprende hasta 0.5 de Fe o hasta 0.3 de Fe (por ejemplo, entre 0.3 y 0.5 de Fe o entre 0.3 y 0.4 de Fe, en porcentaje en peso).

Las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden Cu (Cu). La presencia de Cu puede aumentar la resistencia a la fluencia primaria y también puede aumentar la resistencia máxima a la tracción (UTS) en el producto moldeado resultante. Las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.30 de Cu (en porcentaje en peso). Por ejemplo, las aleaciones de aluminio conductoras pueden comprender hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29 o 0.30 de Cu (en porcentaje en peso). En una realización, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden entre 0.15 y 0.30 de Cu (en porcentaje en peso). En otra realización, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden al menos (por ejemplo, un mínimo de) 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28 o 0.29 de Cu (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio comprenden hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.30, 0.29, 0.28, 0.27, 0.26, 0.25, 0.24, 0.23, 0.22, 0.21, 0.20, 0.19, 0.18, 0.17 o 0.16 de Cu (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio comprenden entre 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28 o 0.29 y 0.30, 0.29, 0.28, 0.27, 0.26, 0.25, 0.24, 0.23, 0.22, 0.21, 0.20, 0.19, 0.18, 0.17 o 0.16 de Cu (en porcentaje en peso). En una realización, las aleaciones de aluminio conductoras pueden comprender entre (por ejemplo, un máximo de) 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16 o 0.17 y 0.18, 0.17, 0.16, 0.15, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.10, 0.09, 0.08, 0.07 o 0.06 de Cu (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras pueden comprender 0.18 de Cu (en porcentaje en peso).

Las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden una adición deliberada de Mg (Mg). Como se indicó anteriormente, la presencia de Mg aumenta la resistencia a la fluencia en el producto moldeado resultante. Las aleaciones de aluminio conductoras pueden comprender 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024 o 0.025 de Mg (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras pueden comprender

0.025 de Mg (en porcentaje en peso).

Las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción comprenden boro (B). Por ejemplo, las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción pueden comprender entre 0.001 y 0.04 de B (en porcentaje en peso). En otra realización, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden al menos (por ejemplo, un mínimo de) 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013, 0.014, 0.016, 0.017, 0.018, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026, 0.027, 0.028, 0.029, 0.03, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034, 0.035, 0.036, 0.037, 0.038 o 0.039 de B (en porcentaje en peso). En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden hasta (por ejemplo, un máximo de) 0.04, 0.039, 0.038, 0.037, 0.036, 0.035, 0.034, 0.033, 0.032, 0.031, 0.03, 0.029, 0.028, 0.027, 0.026, 0.024, 0.023, 0.022, 0.021, 0.02, 0.019, 0.018, 0.017, 0.016, 0.015, 0.014, 0.013, 0.012, 0.011, 0.01, 0.009, 0.008, 0.007, 0.006, 0.005 o 0.004 de B. En otra realización más, las aleaciones de aluminio conductoras comprenden 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013, 0.014, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026, 0.027, 0.028 o 0.029 y 0.03, 0.029, 0.028, 0.027, 0.026, 0.025, 0.024, 0.023, 0.022, 0.021, 0.02, 0.019, 0.018, 0.017, 0.016, 0.015, 0.014, 0.013, 0.012, 0.011, 0.01, 0.009, 0.008, 0.007, 0.006, 0.005, 0.004, 0.003 o 0.002 de B (en porcentaje en peso).

El resto de la aleación de aluminio de la presente descripción es aluminio (Al) e impurezas inevitables. En una realización, cada impureza está presente, en porcentaje en peso, a un máximo de 0.03 y el total de impurezas inevitables está presente, en porcentaje en peso, a menos de 0.10 (en porcentaje en peso).

Se describe como no parte de la invención que las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción pueden proporcionarse en forma de varillas. Las varillas se pueden moldear en una máquina de moldeo continuo de varillas o a partir de palanquillas extruidas. Las varillas se pueden trabajar para formar cables.

Se describe como no parte de la invención que las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción se pueden usar en la fabricación de conductores eléctricos. Como se indica aquí, los productos de aluminio, como los conductores eléctricos, que comprenden las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción exhiben una mayor resistencia a la fluencia en comparación con los conductores eléctricos fabricados a partir de una aleación de aluminio conductora que comprende menos de 0.02 de Mg (en porcentaje en peso).

Se describe como no parte de la invención que la presente descripción también proporciona un procedimiento para mejorar la resistencia a la fluencia de un producto de aluminio en comparación con un producto de aluminio de control. En el contexto de la presente descripción, una mejora de la resistencia a la fluencia se refiere a la reducción de la velocidad de fluencia secundaria. En una realización, las aleaciones de aluminio conductoras de la presente descripción exhiben una velocidad de fluencia secundaria máxima de como máximo 1×10^{-8} s a 100°C bajo una carga de 69 MPa. En el procedimiento, el producto de aluminio está hecho de o comprende la aleación de aluminio de la presente descripción (que comprende al menos alrededor de 0.02 de Mg como una adición deliberada) mientras que el producto de aluminio de control está hecho de o comprende una primera aleación de aluminio (que carece de Mg como adición deliberada o que tiene menos de 0.02 de Mg). El procedimiento comprende añadir magnesio Mg (en el porcentaje en peso descrito anteriormente) a una primera aleación de aluminio (que comprende Fe y Cu y, opcionalmente, Si y/o B, cada uno en el porcentaje en peso descrito anteriormente) para proporcionar la aleación de aluminio modificada (que comprende Fe, Cu y Mg y opcionalmente Si y/o B, cada uno en el porcentaje en peso descrito anteriormente). En el contexto de la presente descripción, la expresión "producto de aluminio" puede hacer referencia a un producto moldeado final o a una varilla intermedia que puede trabajarse adicionalmente para formar un producto de aluminio de forma diferente. Como tal, el procedimiento puede comprender además moldear o trabajar la aleación de aluminio conductora para formar el producto de aluminio. En las realizaciones en las que el producto de aluminio es un producto moldeado, este último puede ser un material conductor eléctrico, tal como un conductor eléctrico. La presente descripción también proporciona un producto de aluminio obtenible u obtenido mediante el procedimiento descrito aquí.

La presente descripción también proporciona un procedimiento para fabricar un producto de aluminio que tiene una resistencia a la fluencia mejorada en comparación con un producto de aluminio de control que carece de una adición deliberada de Mg o que tiene menos de 0.02 de Mg (en porcentaje en peso). El procedimiento comprende trabajar la aleación de aluminio o la aleación de aluminio conductora aquí descrita o, como no parte de la invención, la varilla descrita aquí para formar el producto de aluminio. La etapa de trabajo puede incluir el moldeo de la aleación de aluminio directamente para dar un producto moldeado o varillas intermedias. Como tal, en el contexto de la presente descripción, la expresión "producto de aluminio" puede hacer referencia a un producto moldeado final o a una varilla intermedia que se puede transformar adicionalmente en un producto de aluminio de forma diferente. En las realizaciones en las que el producto de aluminio es un producto moldeado, este último puede ser un material conductor eléctrico, tal como un conductor eléctrico, un cable por ejemplo.

La presente invención se entenderá más fácilmente con referencia a los siguientes ejemplos que se dan para ilustrar la invención.

Ejemplo I - Determinación de la resistencia a la fluencia

Los materiales usados en este ejemplo fueron aleaciones de aluminio 8xxx con tres niveles fijos de Fe (aleaciones base Al-0.3Fe, Al-0.5Fe y Al-0.7Fe), aleado con varias concentraciones de Cu y Mg. A las aleaciones base Al-0.3Fe,

Al-0.5Fe y Al-0.7Fe se les añadió 0.18% y 0.29% de Cu, y a las aleaciones de Al-0.3Fe- 0.18Cu, Al-0.5Fe-0.18Cu y Al-0.7Fe-0.18Cu, respectivamente, se les añadió adicionalmente 0.025%, 0.05% y 0.1% de Mg. Un total de 18 aleaciones con diversos contenidos de Cu, Mg y Fe se dosificaron en un horno de resistencia eléctrica y se moldearon en forma de palanquillas redondas de 10.2 cm (4 pulgadas) de diámetro mediante unidades de moldeo de enfriamiento directo (DC). La composición química de cada una de las 18 aleaciones (L00 a H210) se muestra en la Tabla 1 (todas las composiciones de las aleaciones están en % en peso, a menos que se indique lo contrario). Todas las muestras de varillas de 9.5 mm de diámetro, que son equivalentes a las varillas industriales de suministro de 9.5 mm para cable trefilado, se produjeron mediante extrusión en caliente a partir de palanquillas moldeadas DC.

Entre las 18 aleaciones, la aleación L23 es el único ejemplo según la invención. Las otras 17 aleaciones son ejemplos comparativos.

Tabla 1. Composiciones químicas de las aleaciones experimentales investigadas (% en peso)

Aleaciones	Fe	Cu	Mg	Si	Mn	Cr	Zn	Al
Al-0.3Fe (L00)	0.30	0.01	0.001	0.025	0.002	0.001	0.012	el resto
Al-0.3Fe-0.18Cu (L20)	0.30	0.18	0.001	0.023	0.003	0.001	0.002	el resto
Al-0.3Fe-0.29Cu (L30)	0.30	0.29	0.000	0.033	0.001	0.001	0.012	el resto
Al-0.3Fe0.18Cu-0.03Mg (L23)	0.30	0.18	0.025	0.031	0.002	0.001	0.012	el resto
Al-0.3Fe0.18Cu-0.05Mg (L25)	0.30	0.19	0.052	0.038	0.003	0.001	0.002	el resto
Al-0.3Fe0.18Cu-0.1Mg (L210)	0.30	0.18	0.100	0.049	0.002	0.001	0.012	el resto
Al-0.5Fe (M00)	0.46	0.01	0.001	0.046	0.002	0.001	0.012	el resto
Al-0.5Fe-0.18Cu (M20)	0.50	0.18	0.001	0.027	0.004	0.001	0.002	el resto
Al-0.5Fe-0.29Cu (M30)	0.47	0.29	0.000	0.023	0.002	0.001	0.003	el resto
Al-0.5Fe0.18Cu-0.03Mg (M23)	0.46	0.18	0.026	0.051	0.002	0.001	0.013	el resto
Al-0.5Fe0.18Cu-0.05Mg (M25)	0.44	0.17	0.055	0.021	0.001	0.001	0.002	el resto
Al-0.5Fe0.18Cu-0.1Mg (M210)	0.47	0.18	0.100	0.049	0.002	0.001	0.012	el resto
Al-0.7Fe (H00)	0.70	0.01	0.001	0.023	0.002	0.001	0.013	el resto
Al-0.7Fe-0.18Cu (H20)	0.70	0.19	0.001	0.042	0.003	0.001	0.016	el resto
Al-0.7Fe-0.29Cu (H30)	0.71	0.29	0.000	0.032	0.003	0.001	0.002	el resto
Al-0.7Fe0.18Cu-0.03Mg (H23)	0.69	0.18	0.027	0.052	0.002	0.001	0.013	el resto
Al-0.7Fe0.18Cu-0.05Mg (H25)	0.70	0.18	0.056	0.042	0.003	0.001	0.012	el resto
Al-0.7Fe0.18Cu-0.1 Mg (H210)	0.72	0.18	0.100	0.051	0.002	0.001	0.013	el resto

La medición de la conductividad eléctrica se realizó directamente en las muestras de 9.5 mm de diámetro y 200 mm de largo usando un ohmímetro de resistencia Megger DLRO10HD. El ensayo de tracción se llevó a cabo en probetas cilíndricas (9.5 mm de diámetro y 250 mm de longitud) según la norma ASTM B557 a temperatura ambiente. Los ensayos de fluencia por compresión se realizaron en muestras cilíndricas (con un diámetro de 9.5 mm y una longitud de 19 mm) a 100°C durante 100 horas bajo una carga constante de 69 MPa. Para confirmar la fiabilidad de los resultados, se repitieron 3 ensayos para cada condición.

Para el examen de la microestructura, las varillas extruidas primero se cortaron a 20 mm de longitud y luego se seccionaron longitudinalmente a lo largo de la línea central. Todas las muestras fueron pulidas y tratadas químicamente con la disolución de Keller durante 10 segundos y luego fueron observadas usando la técnica de microscopio óptico (OM), microscopio electrónico de barrido (SEM) y difracción de electrones retrodispersados (EBSD). Se realizaron mapas de EBSD automatizados de la estructura deformada con un tamaño de paso de 0.2 µm usando el software HKL Channel 5 para el análisis de la subestructura. El método de intercepción lineal (como se describe en FJ Humphreys, J. Mater. Sci. 36 (2001) 3833-3854, C. J. Shi, W. M. Mao, X. G. Chen, Mater. Sci. Eng. A 571 (2013) 83-91) se usó para medir el tamaño de subgrano de aleaciones con diferentes contenidos de aleantes. Para asegurar la confiabilidad estadística, se midieron más de 200 subgranos en cada muestra.

Evolución de la microestructura. Las Figs. 1(A) a 1(D) muestran micrografías ópticas de algunas aleaciones típicas con diferentes composiciones después de la extrusión ((A) Al-0.3Fe, (B) Al-0.3Fe-0.29Cu, (C) Al-0.7Fe y (D) Al-0.7Fe0.18Cu-0.1Mg). Debido a la muy baja solubilidad del Fe en la matriz de aluminio, casi todo el Fe precipitó en forma de redes intermetálicas que contenían Fe en la microestructura moldeada. Durante la extrusión en caliente, las redes intermetálicas que contenían Fe se descompusieron en varias partículas finas de dispersión intermetálica. Para todas las aleaciones, las finas partículas intermetálicas, que se confirmaron como Al_mFe, se distribuyeron

uniformemente a lo largo de la dirección de extrusión en la matriz de aluminio. Con el aumento de la cantidad de Fe, de 0.3 a 0.7%, en las tres aleaciones base (Al-0.3Fe, Al-0.5Fe, Al-0.7Fe), la fracción en volumen de partículas intermetálicas que contienen Fe aumentó de 1.8% en Al-0.3Fe a 3.2% en Al-0.5Fe y luego a 4.4% en aleaciones Al-0.7Fe. Cuando se añadieron Cu y Mg a las tres aleaciones base, se encontró que la fracción en volumen de partículas intermetálicas permaneció aproximadamente sin cambios en comparación con las aleaciones base correspondientes. Una comparación de la Fig. 1(A) y (B) muestra la evolución de la distribución de partículas de las aleaciones para la adición de 0.29% de Cu, y una comparación de las Figs. 1(C) y (D) muestra la evolución de la distribución de partículas de las aleaciones para la adición combinada de 0.18% de Cu y 0.1% de Mg. Sin desear estar vinculados a la teoría, esto se puede atribuir a la mayor solubilidad sólida del Cu y el Mg en el aluminio, que es de aproximadamente 0.4% y 1.7% a temperatura ambiente, respectivamente. Por lo tanto, se esperaba que el Cu hasta el 0.29% y el Mg hasta el 0.1% permanecieran todos en la disolución sólida después de la extrusión. Por otro lado, se midió que el tamaño de las partículas intermetálicas que contienen Fe era similar, con un valor medio de 0.38 μm para todas las aleaciones estudiadas.

Para comprender la evolución de la microestructura con adiciones de Cu y Mg en aleaciones de aluminio 8xxx, se examinaron mapas de EBSD de orientación de las mismas muestras de aleación típicas que en la Fig. 1. Todas las aleaciones extruidas mostraron una característica de estructura recuperada (datos no mostrados). Se observó una gran cantidad de límites de ángulo bajo con ángulos de desorientación entre 1° y 5°, lo que indica varias celdas y subgranos. Además, las subestructuras estaban organizadas y se formaron grandes subgranos bien definidos a lo largo de los granos alargados con límites claramente dispuestos de 1-15°, lo que sugiere que ocurrió una recuperación dinámica, lo que implica la aniquilación y reordenación de las dislocaciones.

Aunque la estructura recuperada estaba presente en todas las aleaciones experimentales, se observaron diferencias en el tamaño de subgrano debido a las adiciones de Cu y Mg. En el presente ejemplo, el tamaño medio de subgrano se midió a partir de los mapas de EBSD de orientación y los resultados se ilustran en la Fig. 2. Se encontró que el tamaño medio de subgrano disminuyó de 4.5 μm en Al-0.3Fe a 3.7 μm en Al-0.5Fe y más a 3.2 μm en Al-0.7Fe a medida que la cantidad de Fe aumentó de 0.3% a 0.7% en las aleaciones base. Por otro lado, con el aumento de Cu (0.18-0.29%), el tamaño del subgrano disminuyó ligeramente de 4.5 a 3.8 μm en Al-0.3Fe-Cu, de 3.7 a 3.3 μm en Al-0.5Fe-Cu y de 3.2 a 2.7 μm en aleaciones Al-0.7Fe-Cu (Fig. 2(A)), respectivamente. Sin embargo, una adición adicional de Mg (0.025-0.1%) en las tres aleaciones base casi no mostró efecto sobre el tamaño del subgrano (Fig. 2 (B)). Sin querer estar vinculados a la teoría, la disminución del tamaño del subgrano con el aumento del contenido de Fe en las aleaciones base puede interpretarse como el aumento de la fracción en volumen de partículas intermetálicas que contienen Fe, que tuvo un fuerte efecto de fijación sobre el movimiento de dislocación y el crecimiento del subgrano. Además, los solutos de Cu en disolución de aluminio tienen una velocidad de difusión más baja que la autodifusión de aluminio, lo que obstaculizaría fuertemente el movimiento de dislocación en los límites de los subgranos y mejoraría la multiplicación de dislocaciones, que conduciría al retraso de la recuperación dinámica. Sin embargo, la velocidad de difusión de Mg es muy cercana a la autodifusión de aluminio, lo que dio como resultado poco efecto sobre la recuperación dinámica. Como resultado, con el aumento del nivel de Cu, el tamaño del subgrano disminuyó, mientras que la adición de Mg no mostró ningún efecto sobre el tamaño del subgrano.

Efecto del Cu y Mg sobre la conductividad eléctrica y la resistencia última a la tracción. La Fig. 3 muestra la evolución de la conductividad eléctrica (EC) con diferentes cantidades de Cu y Mg en aleaciones de aluminio 8xxx. Se encontró que la EC disminuyó ligeramente con el aumento de Cu y Mg debido a una mayor dispersión de electrones libres en los solutos de Cu y Mg en aluminio. Al aumentar el Cu de 0 a 0.29%, la EC disminuyó de 62.4 a 60.5% IACS en aleación Al-0.3Fe-Cu y de 60.9 a 59.1% IACS en aleación Al-0.7Fe-Cu (Fig. 3(A)), mientras que al aumentar el Mg del 0% al 0.1%, la CE disminuye del 61.1 al 60.2% IACS en la aleación Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg y del 59.7 al 58.8% IACS en la aleación Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg (Fig. 3(B)), respectivamente.

Para analizar cuantitativamente los datos experimentales, la ley de Matthiessen (como se describe en B. Raeisinia, W.J. Poole, D.J. Lloyd, Mater. Sci. Eng. A 420 (2006) 245-249) se adaptó para establecer la relación de la EC con la composición química de la siguiente manera:

$$\frac{1}{EC} = \rho_b + \sum_i \rho_i C_i + \rho_p f_p \quad (\text{Ec. 1})$$

en la que EC es la conductividad eléctrica, ρ_b es la resistividad de la aleación base, $\sum_i \rho_i C_i$ es la suma de las contribuciones de resistividad de las diversas adiciones de disolución, es decir, ρ_i es el parámetro de resistividad y C_i es la concentración del soluto i, ρ_p es el parámetro de resistividad de las partículas a la resistividad y f_p es la fracción en volumen de partículas. En el presente ejemplo, debido a la baja solubilidad del Fe en aluminio, se puede suponer que casi todo el Fe precipitó en partículas intermetálicas y que la fracción en volumen de las partículas intermetálicas tiene una relación estrecha y lineal con los contenidos de Fe. Como todas las aleaciones tenían partículas de tamaño similar, la contribución de partículas $\rho_p f_p$ en la Ec.1 puede ser sustituida por $\rho'_{Fe} C_{Fe}$. En consecuencia, la Ec. 1 se puede transformar en:

$$\frac{1}{EC} = \rho_b + \rho_{Cu} C_{Cu} + \rho_{Mg} C_{Mg} + \rho'_{Fe} C_{Fe} \quad (Ec.2)$$

en la que EC está en unidades de %IACS, ρ_{Cu} , ρ_{Mg} y ρ'_{Fe} son los parámetros de resistividad de los elementos de aleación Cu, Mg y Fe, y C_{Cu} , C_{Mg} y C_{Fe} son las concentraciones en % en peso. Con base en los resultados de la Fig. 3, los valores de todos los parámetros de resistividad (ρ) se pueden obtener usando el método de regresión lineal múltiple. Subsecuentemente, se puede obtener una expresión empírica para predecir la conductividad eléctrica en función del contenido de elementos de aleación:

$$1/EC = 0.01575 + 0.00174C_{Cu} + 0.00289C_{Mg} + 0.00096C_{Fe} \quad (Ec.3)$$

Usando la Ec. 3, los valores de EC se pueden calcular con diferentes contenidos de Cu, Mg y Fe para aleaciones de aluminio 8xxx. En el presente ejemplo, los valores calculados de la conductividad eléctrica frente a los valores medidos con diferentes contenidos de Cu y Mg en las tres aleaciones base se representan en la Fig. 4 (Al-0.3Fe-Cu-Mg, Al-0.5Fe-Cu-Mg, Al-0.7Fe-Cu-Mg). Como se ha demostrado, existe una excelente concordancia entre los resultados calculados y experimentales. Además, para evaluar la precisión de la ecuación 3, el error entre la EC(C) calculada y la EC(M) medida se puede expresar de la siguiente manera:

$$\% \text{ de error} = \left| \frac{EC(C) - EC(M)}{EC(M)} \right| 100 \quad (Ec.4)$$

Se determinó que el error medio para las aleaciones 8xxx con contenidos de Cu (que van de 0% a 0.29%) y contenido de Mg (que van de 0% a 0.1%) es del 0.13%, lo que confirma nuevamente una excelente concordancia entre la CE predicha y la medida. Por lo tanto, la ecuación 3 obtenida ofrece una muy buena predicción de la conductividad eléctrica en función de los elementos de aleación (Cu, Mg y Fe) en aleaciones de aluminio 8xxx.

Por otro lado, se evaluaron las UTS de las aleaciones con diferentes composiciones y los resultados se muestran en la Tabla 2. Se encontró que la UTS aumentó moderadamente con el aumento de las concentraciones de Cu y Mg, muy probablemente debido al endurecimiento por disolución sólida y al endurecimiento de la subestructura. Los resultados también revelan un efecto beneficioso de Cu y Mg sobre las propiedades mecánicas. Además, la UTS mostró una relación casi lineal con los contenidos de Cu, Mg y Fe, como se muestra en la Fig. 5. La resistencia general σ (UTS) de las aleaciones se puede expresar mediante una ecuación empírica en la forma (como se describe en EA Marquis, D. N. Seidman, D. C. Dunand, Acta Mater. 51 (2003) 4751-4760 y R. A. Karnesky, L. Meng, D. C. Dunand, Acta Mater. 55 (2007) 1299-1308):

$$\sigma(UTS) = \sigma_b + H_{Cu} C_{Cu} + H_{Mg} C_{Mg} + H_{Fe} C_{Fe} \quad (Ec.5)$$

en la que σ_b es la resistencia de la aleación base en unidades de MPa, H_{Cu} , H_{Mg} , y H_{Fe} son los parámetros de endurecimiento de Cu, Mg y Fe, y C_{Cu} , C_{Mg} y C_{Fe} son las concentraciones en % en peso. Usando el método de regresión lineal múltiple, se determinó que el valor de σ_b y parámetros de endurecimiento (H) eran 75.6 para σ_b , 51.1 para H_{Cu} , 66.7 para H_{Mg} y 71.0 para H_{Fe} , respectivamente. Entonces, la ecuación se puede usar para describir la UTS como una función del contenido de elementos de aleación:

$$UTS = 75.6 + 51.1C_{Cu} + 66.7C_{Mg} + 71.0C_{Fe} \quad (Ec.6)$$

Según la Ec. 6, se pueden calcular los valores de UTS con diferentes contenidos de Cu, Mg y Fe. Los valores calculados de la UTS frente a los valores medidos para las aleaciones 8xxx con varios contenidos de Cu, Mg y Fe en diferentes aleaciones base se representaron en la Fig. 6, lo que demostró una buena concordancia entre los resultados calculados y medidos experimentalmente. Además, el error medio entre la UTS(C) calculada y la UTS(M) para las aleaciones 8xxx con adición de Cu (0-0.29%) y Mg (0-0.1%) se determinó que era 1.0%, lo que confirmó la concordancia entre la UTS calculada y medida. Por lo tanto, la ecuación 6 obtenida podría usarse para calcular la UTS de las aleaciones de aluminio 8xxx después de la aleación con varias adiciones de Cu, Mg y Fe.

Tabla 2. Las variaciones de UTS con Cu y Mg en diferentes aleaciones base.

Aleaciones	UTS (MPa)	Aleaciones	UTS (MPa)	Aleaciones	UTS (MPa)
L00	98.2	M00	107.5	H00	126.8
L20	107.7	M20	116.7	H20	134.2
L30	113.2	M30	122.2	H30	141.6
L23	108.5	M23	117.3	H23	138.2

Aleaciones	UTS (MPa)	Aleaciones	UTS (MPa)	Aleaciones	UTS (MPa)
L25	109.7	M25	119.7	H25	138.3
L210	113.5	M210	123.3	H210	142.8

Mediante las Ecs. 3 y 6, la CE y la UTS se podrían calcular cuantitativamente según los contenidos de Cu, Mg y Fe. Para las aleaciones de aluminio conductoras, EC alta con UTS mejorada son las propiedades más deseables en las aleaciones de aluminio 8xxx. Sin embargo, EC alta y UTS alta suelen ser opuestas debido a la naturaleza metalúrgica de ambas propiedades. El perfil de EC y UTS de las aleaciones con diferentes adiciones de Cu y Mg en aleaciones base Al-0.3Fe, Al-0.5Fe y Al-0.7Fe se trazó en la Fig. 7. Esta figura se puede dividir en tres regiones con diferentes combinaciones de CE y UTS. La región I tiene UTS alta pero EC baja mientras que la región III tiene EC alta pero UTS baja. La región II en el medio tiene una EC y UTS equilibradas. En el presente estudio, las aleaciones de 0.3Fe (L00) y 0.5Fe (M00) tienen una CE más alta pero una UTS más baja (región III) en comparación con la aleación de 0.7Fe (H00) (región II). Con adiciones de Cu y Mg, las aleaciones 0.3Fe y 0.5Fe se trasladaron a la región II con EC y UTS equilibradas. Por ejemplo, las aleaciones de 0.5Fe con adiciones de Cu y Mg posiblemente podrían tener un valor similar de EC y UTS en comparación con la aleación de 0.7Fe (H00). También es evidente que las aleaciones 0.7 con adiciones de Cu y Mg tienden a moverse de la región II a la región I, que tiene mayor UTS pero relativamente menor EC. Al ajustar los elementos de aleación de Fe y Cu y Mg, se pueden obtener diferentes combinaciones de EC y UTS para cumplir con diferentes requisitos de diseño para aplicaciones de productos específicos.

Efectos de Cu y Mg en las propiedades de fluencia. La Fig. 8 muestra las curvas típicas de deformación por fluencia (ϵ) y velocidad de fluencia instantánea ($d\epsilon/dt$ o $\dot{\epsilon}$) de aleaciones Al-0.3Fe con adiciones de Cu, ensayadas a 100°C bajo una carga constante de 69 MPa. Puede verse que la deformación por fluencia total disminuye considerablemente desde el 6.87% en la aleación base Al-0.3Fe hasta el 2.44% en la aleación Al-0.3Fe-0.29Cu (Fig. 8(A)). En general, durante la deformación por fluencia por compresión, la deformación por fluencia aumenta rápidamente con el aumento del tiempo al comienzo de la deformación por fluencia debido a una alta velocidad inicial de endurecimiento por trabajo (definida como la etapa primaria, en la que $d\epsilon/dt > 0$). Subsecuentemente, la deformación por fluencia pasa a un estado cuasi-estacionario, en el que la velocidad de fluencia, $d\epsilon/dt$, se vuelve más o menos constante (a saber, la segunda etapa, $d\epsilon/dt \approx 0$). Se sugiere que la segunda etapa domina la deformación por fluencia durante el proceso de fluencia a largo plazo. Como se muestra en la Fig. 8(B), la velocidad de fluencia mínima ($\dot{\epsilon}_m$ en s^{-1}) se calcula como la velocidad media de fluencia en la segunda etapa, y los resultados muestran que al aumentar el contenido de Cu de 0% a 0.29%, el $\dot{\epsilon}_m$ ligeramente disminuyó de 8.1×10^{-8} a $6.1 \times 10^{-8} s^{-1}$. Los resultados de la Fig. 8 indicaron que la adición de Cu fue principalmente beneficiosa en la etapa de fluencia primaria, pero tiene muy poco efecto en la segunda etapa de fluencia.

La Fig. 9 muestra las curvas de deformación por fluencia típica (ϵ) y velocidad de fluencia instantánea ($d\epsilon/dt$ o $\dot{\epsilon}$) de aleaciones Al-0.3Fe-0.18Cu con diferentes cantidades de Mg. De manera similar a la Fig. 8, la curva de fluencia por compresión consiste en la etapa de fluencia primaria y la segunda etapa. Como se muestra en la Fig. 9(A), se puede encontrar que la deformación por fluencia total disminuye considerablemente al aumentar el contenido de Mg y el valor disminuye de 4.17% en la aleación base (Al-0.3Fe-0.18Cu) a 0.14% en la aleación que contiene 0.1% de Mg (Al-0.3Fe-0.18 Cu-0.1 Mg). Por otro lado, como se muestra en la Fig. 9(B), con el aumento de Mg de 0% a 0.1%, la $\dot{\epsilon}_m$ disminuye significativamente de $7.5 \times 10^{-8} s^{-1}$ en la aleación base a $4.8 \times 10^{-10} s^{-1}$ con la aleación que contiene 0.1% de Mg, lo que indica un fuerte y positivo efecto del Mg en la mejora de la velocidad de fluencia mínima. Se sugiere que la adición de Mg fue beneficiosa para mejorar en gran medida la propiedad de fluencia tanto en la etapa de fluencia primaria como en la segunda etapa.

A partir de las curvas de deformación por fluencia (ϵ) y velocidad de fluencia ($d\epsilon/dt$ o $\dot{\epsilon}$) como se muestra en las Figs. 8 y 9, se observa que las adiciones de Cu y Mg mostraron un impacto diferente en la resistencia a la fluencia de aleaciones de aluminio 8xxx. Para comprender mejor el efecto del Cu y Mg, se evaluó la evolución de la deformación por fluencia primaria (ϵ_p) y de la velocidad mínima de fluencia como función de los contenidos de Cu y Mg, como se muestra en la Fig. 10. La deformación por fluencia primaria ϵ_p se obtiene extrapolando la segunda curva de fluencia linealmente a tiempo cero (X. W. Wei, X. T. Zu, W. L. Zhou, Mater. Sci. Tech. 22 (2006) 730-733), como se ilustra mediante la línea de puntos en la Fig. 8(A). Como se indica en las Figs. 10(A) y (B), la deformación por fluencia primaria ϵ_p disminuyó significativamente con el aumento del contenido de Cu y Mg. Al aumentar el Cu del 0% al 0.29% en porcentaje en peso (Fig. 10(A)), la deformación por fluencia primaria disminuyó del 3.82% al 0.43% en las aleaciones Al-0.3Fe-Cu (89% de reducción), del 1.25% al 0.22% en aleaciones Al-0.5Fe-Cu (82% de reducción), y del 0.71% a 0.15% en aleaciones Al-0.7Fe-Cu (79% de reducción), respectivamente. Como se muestra en la Fig. 10(B), cuando el Mg aumenta del 0% al 0.1% (en porcentaje en peso), la deformación por fluencia primaria (ϵ_p) disminuyó considerablemente del 1.37% al 0.09% en aleaciones de Al-0.3Fe-0.18Cu-Mg (93% de reducción), del 0.43% al 0.07% en aleaciones de Al-0.5Fe-0.18Cu-Mg (84% de reducción), y del 0.25% al 0.05% en aleaciones Al-0.7Fe-0.18Cu-Mg (reducción del 80%). Los resultados indicaron el efecto positivo de ambas pequeñas adiciones de Cu y Mg en la deformación por fluencia primaria.

La evolución de la velocidad mínima de fluencia ($\dot{\epsilon}_m$) en función del contenido de Cu y Mg se ilustra en las Figs. 10(C) y (D). Es interesante notar que la adición de Cu casi no tuvo efecto sobre la velocidad mínima de fluencia, mientras que el Mg disminuyó notablemente la velocidad mínima de fluencia. Al aumentar el contenido de Mg del 0% al 0.1% (Fig. 10(d)),

la velocidad mínima de fluencia disminuye notablemente de $7.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ a $4.8 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ en aleaciones Al-0.3Fe0.18Cu-Mg (99% de reducción), y de $1.8 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ a $2.8 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ en aleaciones Al-0.3Fe0.18Cu-Mg (98% de reducción) y más de $5.6 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ a $2.1 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ en aleaciones Al-0.3Fe0.18Cu-Mg (96% de reducción), respectivamente.

Aunque las adiciones de poco Cu y Mg pueden mejorar considerablemente las propiedades de fluencia, los elementos aleantes individuales pueden tener impactos diferentes. En primer lugar, con el aumento del Cu, el tamaño del subgrano disminuyó ligeramente, lo que puede retardar moderadamente el movimiento de dislocación y de este modo disminuye la deformación por fluencia primaria. Además, el endurecimiento de la disolución sólida de Cu debe ser el principal responsable de la disminución significativa de la deformación por fluencia primaria, porque los solutos de Cu aumentan la capacidad de endurecimiento por trabajo del material. Por otro lado, los resultados muestran que la pequeña adición de Cu no tuvo efecto sobre la velocidad mínima de fluencia durante la segunda etapa de fluencia, lo que probablemente se deba a la baja interacción entre la dislocación y la atmósfera de soluto de Cu. Sin desear estar vinculados a la teoría, esos resultados sugirieron que la adición de Cu podría ser efectiva para aumentar la resistencia a la fluencia durante la deformación por fluencia a corto plazo, en la que la etapa de fluencia primaria juega un papel importante. Por el contrario, la adición de Cu puede no ofrecer una ventaja para la resistencia a la fluencia bajo la deformación por fluencia a largo plazo.

La pequeña adición de Mg (0.025-0.1%) en la aleación de aluminio 8xxx parece no tener un efecto obvio en la microestructura deformada como se muestra en la Fig. 2. Sin embargo, puede disminuir considerablemente tanto la deformación por fluencia primaria (ϵ_p) como la velocidad mínima de fluencia ($\dot{\epsilon}_m$), lo que da como resultado una mejora significativa en las propiedades de fluencia.

Vale la pena mencionar que el efecto del Cu y Mg en la propiedad de fluencia disminuyó con el aumento de Fe en las aleaciones base, como se muestra en la Fig. 10. Se cree que la adición de Cu y Mg es más efectiva para aumentar la propiedad de fluencia de aleaciones de aluminio 8xxx en condiciones de bajo contenido de Fe.

En conclusión, la adición de Cu promovió el retraso de la recuperación dinámica, lo que conduce a un tamaño de subgrano más fino. Sin embargo, la adición de Mg mostró poco efecto sobre el retraso de la recuperación dinámica. Las adiciones de Cu y Mg aumentaron razonablemente la UTS pero disminuyeron ligeramente la CE. Los efectos de Cu, Mg y Fe en UTS y EC se evaluaron cuantitativamente y se resumieron en las Ecs. 3 y 6, que ofrecen una buena predicción de las UTS y EC en función de los elementos de aleación (Cu, Mg y Fe) en aleaciones de aluminio 8xxx conductoras. La adición de Cu disminuye notablemente la deformación por fluencia primaria (ϵ_p) y no muestra casi ningún efecto sobre la velocidad mínima de fluencia ($\dot{\epsilon}_m$), lo que lleva a un efecto beneficioso sobre la deformación por fluencia temprana, pero ninguna ventaja para la resistencia a la fluencia en el proceso de fluencia a largo plazo. La pequeña adición de Mg redujo en gran medida tanto la deformación por fluencia primaria como la velocidad mínima de fluencia, lo que dio como resultado una mejora significativa y efectiva en la resistencia a la fluencia de aleaciones de aluminio 8xxx conductoras.

Ejemplo II - Propiedades de moldeo

Los materiales usados en este ejemplo fueron varias aleaciones de aluminio como se muestra en la Tabla 3 (todas las composiciones de aleación están en % en peso a menos que se indique lo contrario). Las aleaciones se dosificaron en un horno de 100 toneladas y se moldearon en una máquina de moldeo continuo de varillas. El metal líquido se solidifica en forma de barra rectangular que se lamina inmediatamente hasta una varilla de 9.5 mm.

Tabla 3. Composiciones químicas de las aleaciones experimentales investigadas (% en peso) que están fuera del alcance de la invención

Aleaciones	Fe	Cu	Mg	Si	Al
1	0.69	0.18	-	0.05	El resto
2	0.55	0.01	-	0.05	El resto
3	0.35	0.17	-	0.05	El resto
4	0.16	-	-	0.05	El resto

La temperatura de la barra, usada como marcador sustituto de la eficiencia de moldeo, se determinó usando termopar y/o pirómetro. Como se muestra en la Figura 11, las aleaciones de aluminio conductoras que tienen 0.5 de Fe o menos exhiben una temperatura de barra más baja y de este modo se considera que se moldean de más eficientemente.

REIVINDICACIONES

1. Una aleación de aluminio conductora, comprendiendo la aleación de aluminio conductora, en porcentaje en peso:
hasta 0.10 de Si;
hasta 0.5 de Fe;
5 hasta 0.30 de Cu;
entre 0.02 y 0.025 de Mg;
hasta 0.04 de B; y
siendo el resto aluminio e impurezas inevitables.
- 10 2. La aleación de aluminio conductora de la reivindicación 1, que comprende hasta 0.05 de Si, en porcentaje en peso.
3. La aleación de aluminio conductora de la reivindicación 1 o 2, que comprende entre 0.3 y 0.5 de Fe, en porcentaje en peso.
4. La aleación de aluminio conductora de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende entre 0.15 y 0.30 de Cu y preferiblemente hasta 0.18 de Cu, en porcentaje en peso.
- 15 5. La aleación de aluminio de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende entre 0.001 y 0.04 de B, en porcentaje en peso.
6. Un procedimiento para fabricar un producto de aluminio que comprende una aleación de aluminio conductora, comprendiendo el procedimiento la etapa de trabajar la aleación de aluminio conductora de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.
- 20 7. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que la aleación de aluminio conductora comprende hasta 0.05 de Si, en porcentaje en peso.
8. El procedimiento de la reivindicación 6 o 7, en el que la aleación de aluminio conductora comprende entre 0.3 y 0.5 de Fe, en porcentaje en peso.
9. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la aleación de aluminio conductora comprende entre 0.15 y 0.30 de Cu y preferiblemente hasta 0.18 de Cu, en porcentaje en peso.
- 25 10. El procedimiento de una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, en el que la aleación de aluminio conductora comprende entre 0.001 y 0.04 de B, en porcentaje en peso.

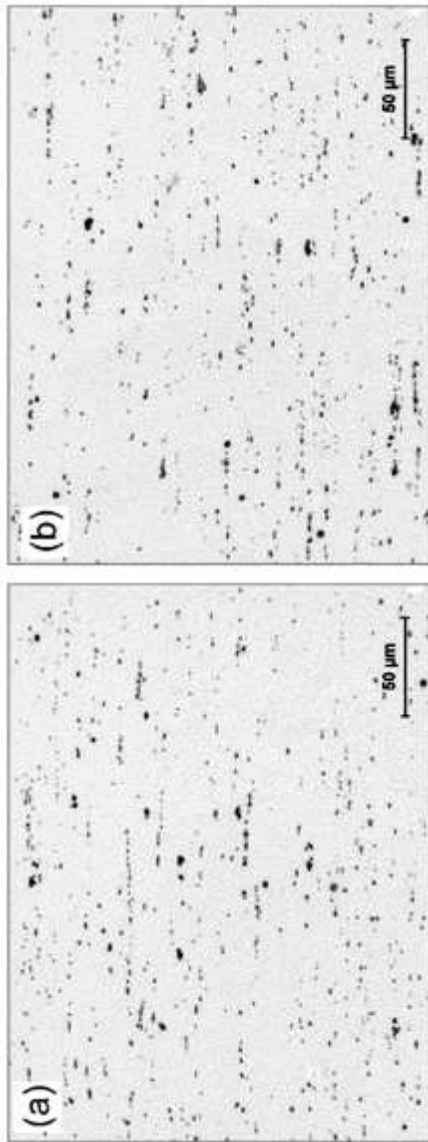


Figura 1a

Figura 1b

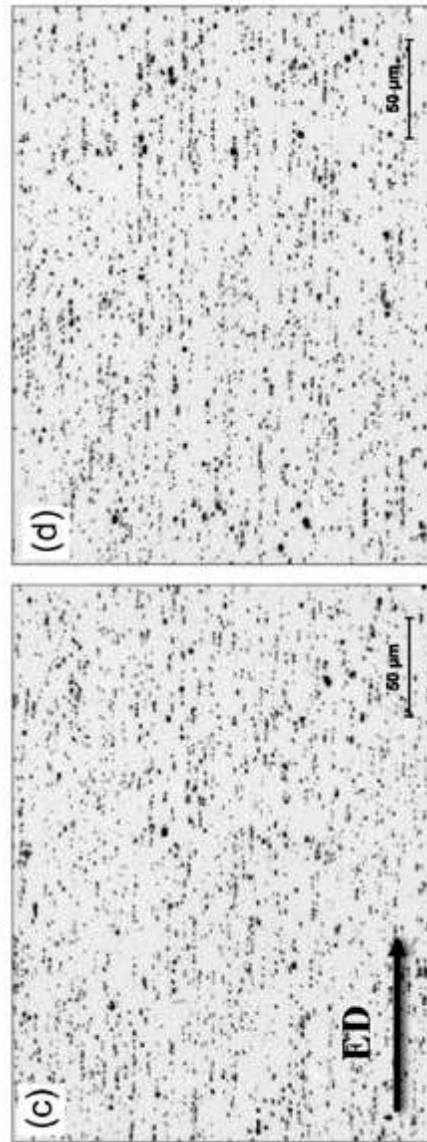


Figura 1c

Figura 1d

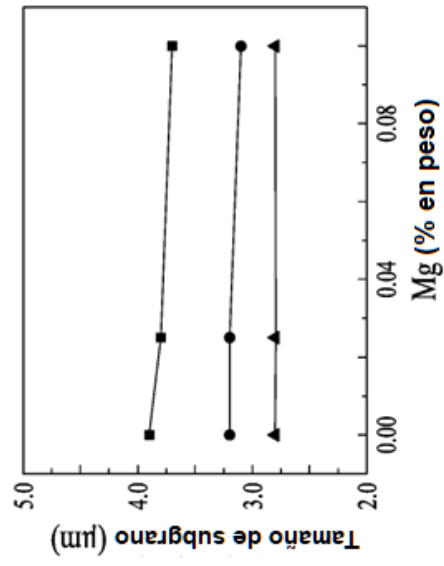


Figura 2b

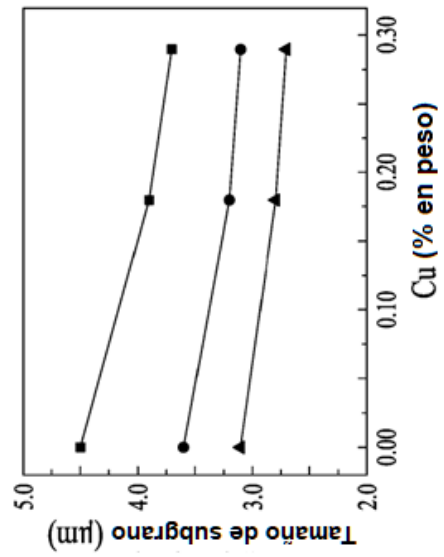


Figura 2a

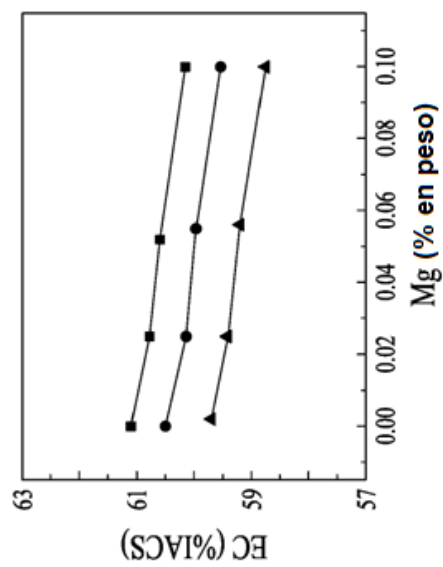


Figura 3b

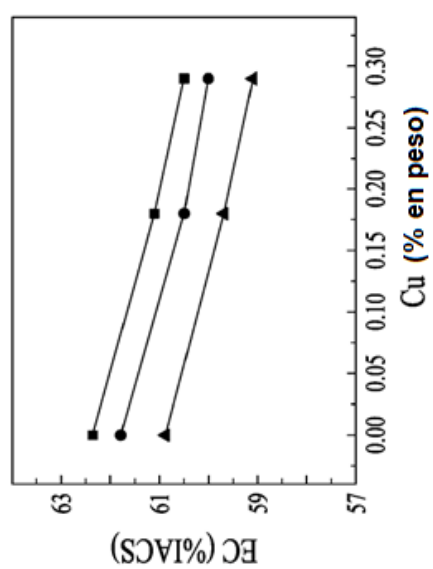


Figura 3a

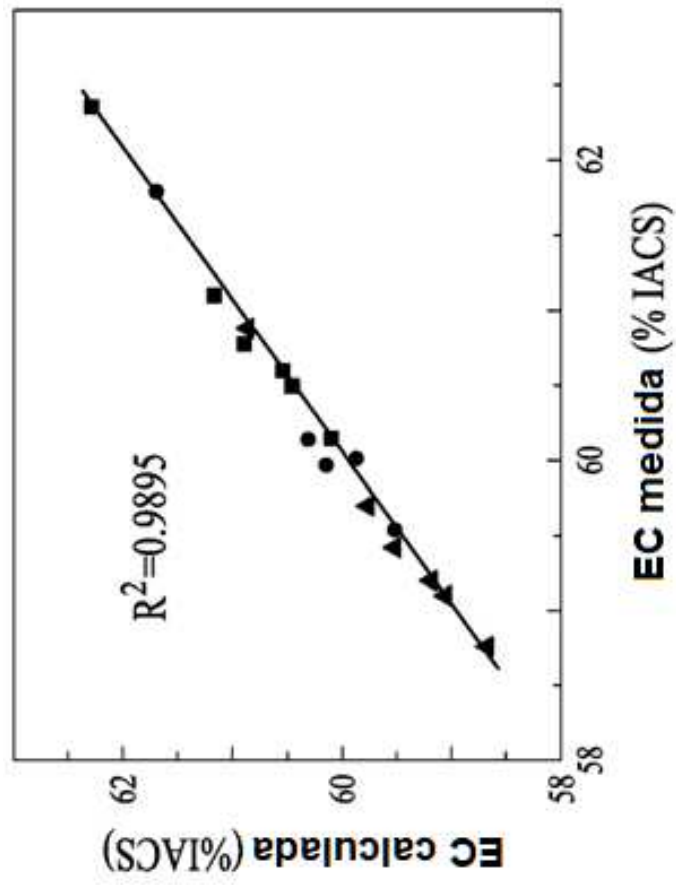
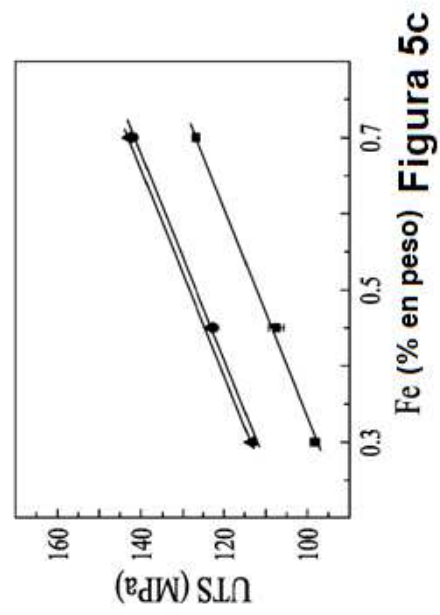
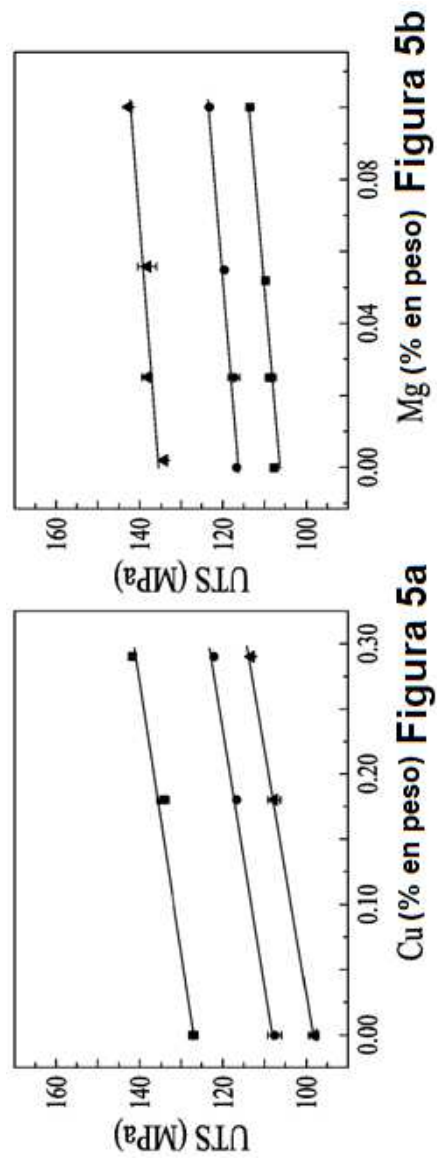


Figura 4



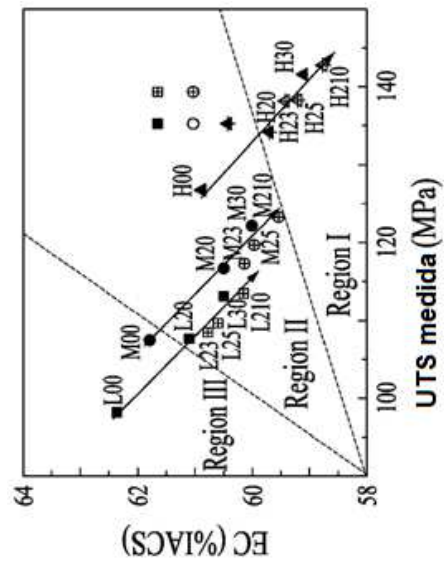


Figura 7

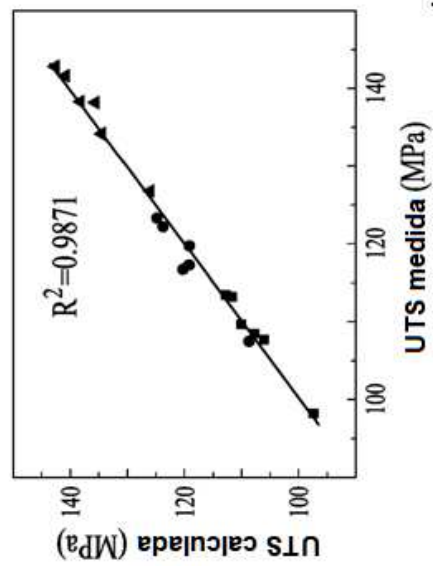


Figura 6

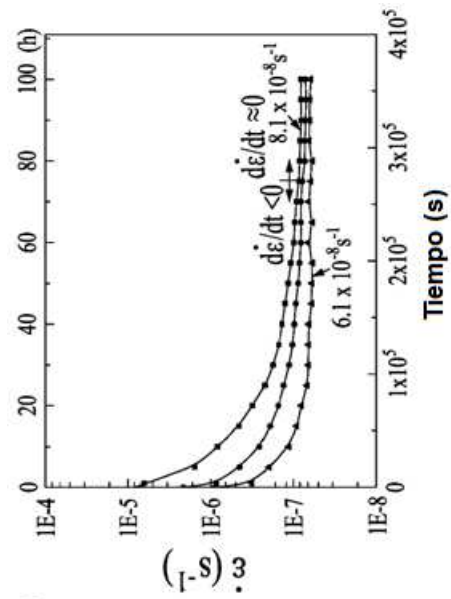


Figura 8a

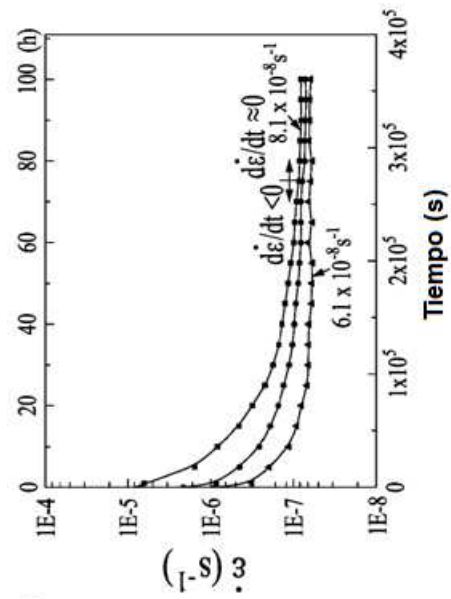


Figura 8b

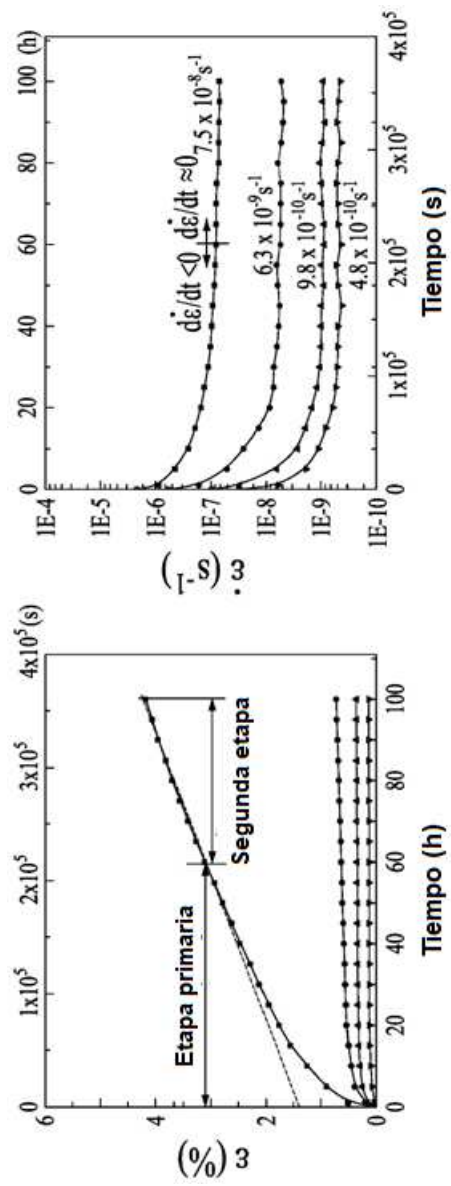


Figura 9b

Figura 9a

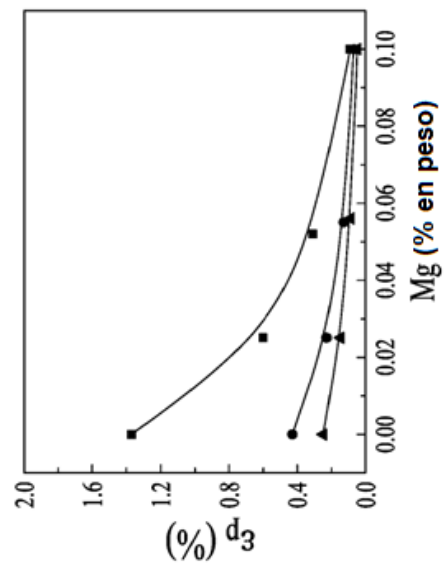


Figura 10b

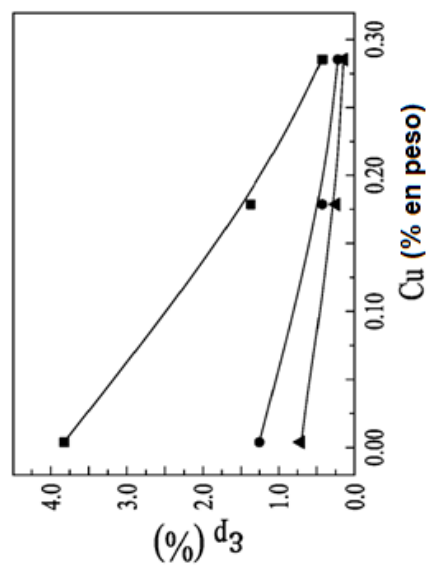


Figura 10a

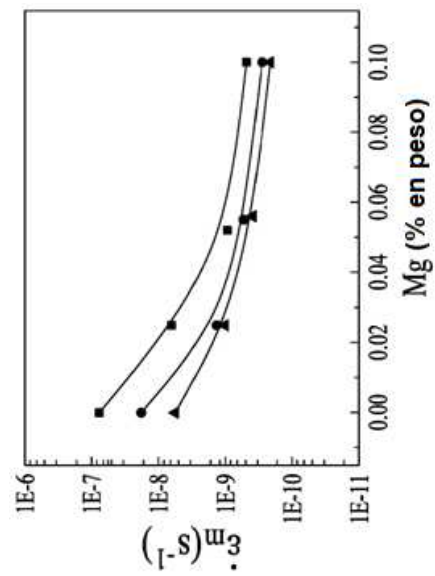


Figura 10d

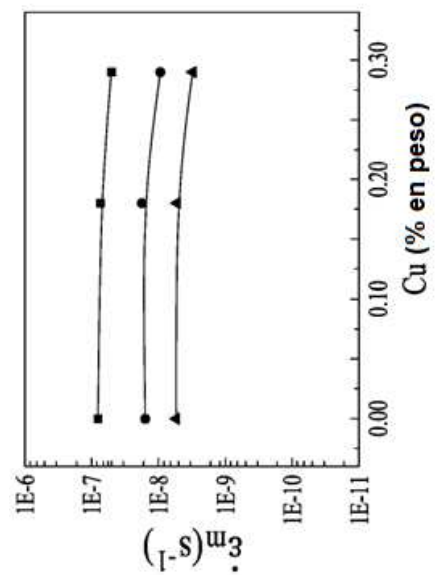


Figura 10c

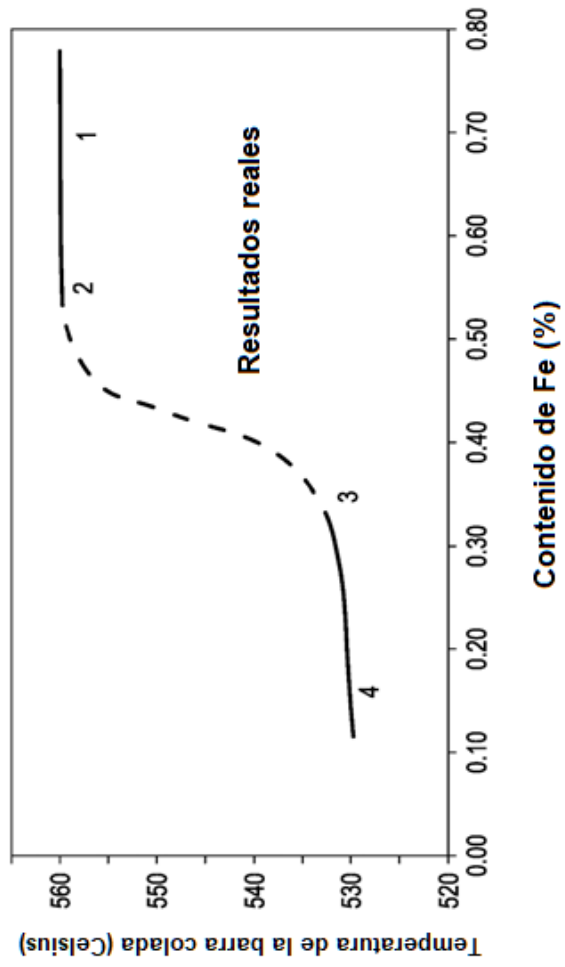


Figura 11