

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 494 416**

51 Int. Cl.:

B22D 7/00 (2006.01)
B22D 15/04 (2006.01)
B22D 21/04 (2006.01)
B22D 30/00 (2006.01)
B22D 7/12 (2006.01)
B22D 9/00 (2006.01)
B29C 33/04 (2006.01)
B29C 39/38 (2006.01)
C22F 1/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.10.2006 E 10010441 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.07.2014 EP 2305397**

54 Título: **Homogeneización y tratamiento térmico de metales colados**

30 Prioridad:

28.10.2005 US 731124 P
03.11.2005 US 733943 P
25.04.2006 US 794600 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.09.2014

73 Titular/es:

NOVELIS, INC. (100.0%)
3560 Lenox Road, Suite 2000
Atlanta, GA 30326, US

72 Inventor/es:

WAGSTAFF, ROBERT BRUCE y
FENTON, WAYNE J.

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 494 416 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

Homogeneización y tratamiento térmico de metales colados.

CAMPO TÉCNICO

5 Esta invención se refiere a la colada de metales, particularmente las aleaciones metálicas AA3003 y AA3104, y su tratamiento para hacerlas adecuadas para formar productos metálicos tales como artículos en chapa y plancha.

ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA

US 3.938.991 describe un artículo mecanizado que posee un tamaño de grano fino recristalizado que se prepara a partir de una aleación base de aluminio que comprende, en porcentaje en peso, hasta 0,6% de silicio, hasta 0,7% de hierro, hasta 1,5% de manganeso y 0,03- 0,20% de vanadio.

10 Las aleaciones metálicas, y particularmente las aleaciones de aluminio, se moldean a menudo a partir de la forma fundida para producir lingotes o tochos que se someten subsiguientemente a laminación, mecanizado en caliente, o análogos, a fin de producir artículos de chapa o plancha utilizados para la fabricación de numerosos productos. Los lingotes se producen frecuentemente por colada directa en coquilla (DC), pero existen métodos de colada equivalentes, tales como la colada electromagnética (v.g. como se tipifica por las patentes U.S. 3.985.179 y 15 4.004.631, concedidas ambas a Goodrich et al.), que se emplean también. La exposición que sigue se refiere fundamentalmente a la colada DC, pero los mismos principios son aplicables a la totalidad de dichos procedimientos de colada que dan lugar a las mismas o equivalentes propiedades microestructurales en el metal colado.

La colada DC de metales (v.g. aluminio y aleaciones de aluminio - a los que se hace referencia colectivamente en lo que sigue como aluminio) para producir lingotes se lleva a cabo típicamente en un molde de poca profundidad y 20 abierto por los extremos, axialmente vertical, que está cerrado inicialmente en su extremo inferior por una plataforma móvil hacia abajo (a la que se hace referencia a menudo como bloque de fondo). El molde está rodeado por una camisa de refrigeración a través de la cual se hace circular continuamente un fluido refrigerante tal como agua a fin de proporcionar enfriamiento externo de la pared del molde. El aluminio (u otro metal) fundido se introduce en el extremo superior del molde enfriado y, a medida que el metal fundido se solidifica en una región adyacente a la 25 periferia interior del molde, la plataforma se desplaza hacia abajo. Con un movimiento eficazmente continuo de la plataforma y suministro correspondientemente continuo de aluminio fundido al molde, puede producirse un lingote de la longitud deseada, limitado únicamente por el espacio disponible bajo el molde. Detalles adicionales de la colada DC pueden obtenerse de la patente U.S. 2.301.027 concedida a Ennor (cuya exposición se incorpora en esta memoria por referencia), y otras patentes.

30 La colada DC puede realizarse también horizontalmente, es decir con el molde orientado en posición distinta de la vertical, con cierta modificación del equipo y, en tales casos, la operación de colada puede ser esencialmente continua. En la exposición que sigue, se hace referencia a la colada en coquilla vertical, pero los mismos principios son aplicables a la colada DC horizontal.

El lingote que sale por el extremo inferior (salida) del molde en la colada DC vertical es externamente sólido pero 35 está todavía fundido en su núcleo central. Dicho de otro modo, el conjunto de metal fundido en el interior del molde se prolonga hacia abajo en la porción central del lingote que se desplaza en sentido descendente a lo largo de cierta distancia por debajo del molde como un pozo de metal fundido. Este foso tiene una sección transversal progresivamente decreciente en la dirección descendente dado que el lingote se solidifica hacia dentro desde la superficie exterior hasta que su porción de núcleo se solidifica totalmente. La porción del producto de metal colado 40 que tiene una corteza exterior sólida y un núcleo fundido se designa en esta memoria como un lingote embrionario que se transforma en un lingote colado cuando se solidifica por completo.

Como una característica importante del proceso de colada directa en coquilla, un fluido refrigerante suministrado continuamente, tal como agua, se pone en contacto directo con la superficie exterior del lingote embrionario que avanza inmediatamente por debajo del molde, causando con ello el enfriamiento directo del metal de la superficie. 45 Este enfriamiento directo de la superficie del lingote sirve a la vez para mantener la porción periférica del lingote en estado sólido y para promover el enfriamiento y la solidificación internos del lingote.

Convencionalmente, se proporciona una sola zona de enfriamiento por debajo del molde. Típicamente, la acción refrigerante en esta zona se efectúa dirigiendo un flujo sustancialmente continuo de agua uniformemente a lo largo de la periferia del lingote inmediatamente por debajo del molde, descargándose el agua, por ejemplo, por el extremo inferior de la camisa de refrigeración del molde. En este procedimiento, el agua choca con fuerza o impulso considerable sobre la superficie del lingote en un ángulo sustancial con la misma y fluye hacia abajo sobre la superficie del lingote con un efecto refrigerante continuado pero decreciente hasta que la temperatura de la superficie del lingote se aproxima a la del agua. 50

Típicamente, el agua de refrigeración, después del contacto con el metal caliente, sufre primeramente dos eventos de ebullición. Un film constituido predominantemente por vapor de agua se forma directamente bajo el líquido en la región estancada del chorro e inmediatamente adyacente a esto, en las regiones superiores próximas, a ambos 55

5 lados y por debajo del chorro, tiene lugar una ebullición clásica del film nucleado. A medida que se enfría el lingote, y que disminuye la nucleación y el efecto de mezcladura de las burbujas, las condiciones de flujo de fluido y de la capa térmica límite cambian a convección forzada bajo la masa del lingote hasta que, finalmente, las condiciones hidrodinámicas cambian a un film simple de caída libre a través de la superficie total del lingote en los extremos inferiores del mismo.

10 Los lingotes de colada directa en coquilla producidos de este modo se someten generalmente a pasos de laminación en caliente y en frío, u otros procedimientos de mecanizado en caliente, a fin de producir artículos tales como chapa o plancha de diversos espesores y anchuras. Sin embargo, en la mayoría de los casos se requiere normalmente un procedimiento de homogeneización antes de la laminación u otro procedimiento de mecanizado en caliente a fin de convertir el metal en una forma más utilizable y/o mejorar las propiedades finales del producto laminado. La homogeneización se lleva a cabo para equilibrar gradientes de concentración microscópicos. El paso de homogeneización implica el calentamiento del lingote colado a una temperatura elevada (generalmente una temperatura superior a una temperatura de transición, v.g. una temperatura del solvus de la aleación, a menudo superior a 450°C y comprendida típicamente (para muchas aleaciones) en el intervalo de 500 a 630°C) durante un periodo de tiempo considerable, v.g. unas cuantas horas y generalmente hasta 30 horas.

20 La necesidad de este paso de homogeneización es resultado de las deficiencias de microestructura encontradas en el producto colado resultante de las etapas iniciales o etapas finales de la solidificación. A nivel microscópico, la solidificación de las aleaciones coladas DC se caracteriza por cinco eventos: (1) la nucleación de la fase primaria (cuya frecuencia puede estar asociada o no con la presencia de un afinador del grano); (2) la formación de una estructura celular, dendrítica o combinación de estructuras celular y dendrítica que definen un grano; (3) el rechazo de soluto por la estructura celular/dendrítica debido a las condiciones de solidificación prevalecientes distintas del equilibrio; (4) el desplazamiento del soluto rechazado que se mejora por el cambio de volumen de la fase primaria en solidificación; y (5) la concentración del soluto rechazado y su solidificación a una temperatura de reacción terminal (v.g. eutéctica).

25 La estructura resultante del metal es por consiguiente muy compleja y se caracteriza por variaciones de composición a través no sólo del grano sino también en las regiones adyacentes a las fases intermetálicas en las que coexisten regiones relativamente blandas y duras en la estructura y, si no se modifican o transforman, crearán variaciones inaceptables en la propiedad de calibre final para el producto final.

30 La homogeneización es un término genérico utilizado generalmente para describir un tratamiento térmico designado para corregir las deficiencias microscópicas en la distribución de los elementos del soluto y (concomitantemente) modificar las estructuras intermetálicas presentes en las interfases. Los resultados aceptados de un proceso de homogeneización incluyen lo siguiente:

1. La distribución elemental en el interior de un grano llega a hacerse más uniforme.
- 35 2. Cualesquiera partículas constituyentes de bajo punto de fusión (v.g. eutécticas) que se hayan formado en los límites del grano y los puntos triples durante la colada se disuelven de nuevo en los granos.
3. Ciertas partículas intermetálicas (v.g. peritéticas) sufren transformaciones químicas y estructurales.
4. Las partículas intermetálicas grandes (v.g. peritéticas) que se forman durante la colada pueden fracturarse y redondearse durante el calentamiento.
- 40 5. Los precipitados (tales como los que pueden utilizarse para desarrollo subsiguiente a fin de reforzar el material), que se forman durante el calentamiento, se disuelven y se precipitan más tarde uniformemente a través del grano después de disolución y redistribución a medida que el lingote se enfría nuevamente una vez más por debajo del solvus y se mantienen a una temperatura constante dejando que se formen núcleos y crezcan, o se enfría a la temperatura ambiente y se precalienta a las temperaturas de mecanizado en caliente.

45 En algunos casos, es necesario aplicar tratamientos térmicos a los lingotes durante el proceso de colada DC actual a fin de corregir campos de tensión diferencial inducidos durante el proceso de colada. Los expertos en la técnica distinguen las aleaciones en aquéllas que se agrietan después de la solidificación o antes de la solidificación en respuesta a estas tensiones.

50 Las grietas post-solidificación están causadas por tensiones macroscópicas que se desarrollan durante la colada, que ocasionan la formación de grietas de una manera trans-granular después de completarse la solidificación. Esto se corrige típicamente por mantenimiento de la temperatura de la superficie del lingote (con disminución por tanto del gradiente de temperatura - y con ello la deformación- en el lingote) a un nivel elevado durante el proceso de colada y por transferencia convencional de los lingotes colados a un horno de eliminación de tensiones inmediatamente después de la colada.

55 Las grietas pre-solidificación están causadas también por tensiones macroscópicas que se desarrollan durante la colada. Sin embargo, en este caso, las tensiones macroscópicas formadas durante la solidificación se eliminan por

rotura o cizallamiento de la estructura, inter-granularmente, a lo largo de redes eutécticas de bajo punto de fusión (asociadas con rechazo de soluto durante la solidificación). Se ha encontrado que la igualación, desde el centro a la superficie, del diferencial de gradiente de temperatura lineal (es decir la derivada de la temperatura de la superficie hasta el centro del lingote emergente) puede mitigar con éxito dicho agrietamiento).

5 Estos defectos hacen que el lingote sea inaceptable para muchos propósitos. Se han realizado diversos intentos para resolver este problema por control de la velocidad de enfriamiento de la superficie de un lingote durante la colada. Por ejemplo, en aleaciones propensas a agrietamiento post-solidificación, Zeigler, en la Patente U.S. 2.705.353, utilizaba un contacto deslizante para retirar el fluido refrigerante de la superficie del lingote a cierta distancia por debajo del molde a fin de que el calor interno del lingote pudiera recalentar la superficie enfriada. La
10 intención era mantener la temperatura de la superficie a un nivel superior a aproximadamente 300°F (149°C) y, preferiblemente, dentro de un intervalo de recocido típico de aproximadamente 400 a 650°F (204 a 344°C).

Zinniger, en la Patente U.S. 4.237.961, presentaba otro sistema de colada directa en coquilla con un dispositivo refrigerante de contacto deslizante en forma de un collar elastómero inflable de contacto deslizante. Esto servía para el mismo propósito básico que el descrito en la patente de Zeigler anterior, manteniéndose la temperatura de la
15 superficie del lingote a un nivel suficiente para eliminar las tensiones internas. En el ejemplo de la patente de Zinniger, la superficie del lingote se mantiene a una temperatura de aproximadamente 500°F (260°C), que está de nuevo dentro del intervalo de recocido. El propósito de este procedimiento era permitir la colada de lingotes de sección transversal muy grande por prevención del desarrollo de tensiones térmicas excesivas en el interior del lingote.

20 En aleaciones propensas a grietas pre- solidificación, Bryson, en la Patente U.S. 3.713.479, utilizaba dos niveles de refrigeración por pulverización de agua de menor intensidad para reducir la velocidad de enfriamiento y lograr que éste se extienda a una mayor distancia por debajo del lingote a medida que el lingote desciende y, como resultado de este trabajo, demostró la posibilidad de aumentar las velocidades globales de colada alcanzadas en el proceso.

Otro diseño de dispositivo de colada directa en coquilla utilizando un contacto deslizante para la retirada del agua de refrigeración se muestra en Ohatake et al. en la Patente de Canadá 2.095.085. Con este diseño, se utilizan chorros primarios y secundarios de refrigeración con agua, seguidos por un contacto deslizante para retirar el agua, yendo
25 seguido el contacto deslizante por un tercer chorro de agua de refrigeración.

EXPOSICIÓN DE LA INVENCION

30 La presente invención, que se presenta en las reivindicaciones, se refiere a un método de calentamiento de un lingote metálico colado de aleación de aluminio AA3003 o AA3104, a fin de preparar dicho lingote para mecanizado en caliente a una temperatura predeterminada, método que comprende

(a) precalentar dicho lingote a una temperatura de nucleación que es inferior a dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente y es una temperatura a la cual se produce nucleación del precipitado en el metal para causar que tenga lugar nucleación, estando comprendida dicha temperatura de nucleación en un
35 intervalo que va desde 380°C a 450°C;

(b) mantener dicho lingote a dicha temperatura de nucleación, o aumentar gradualmente la temperatura de dicho lingote desde dicha temperatura de nucleación a una tasa menor que 25°C/h hasta una temperatura de nucleación más alta dentro de dicho intervalo de 380°C-450°C, durante un periodo de 2 a 4 horas;

(c) después de dicho paso de mantenimiento (b), calentar adicionalmente dicho lingote a una temperatura de crecimiento del precipitado comprendida en un intervalo de 480°C to 550°C y mantener el lingote a dicha temperatura durante al menos 10 horas, a la cual
40

se produce crecimiento del precipitado para causar crecimiento del precipitado en el metal, siendo mayor dicho crecimiento del precipitado que la o cada temperatura de nucleación del paso (b); y

(d) si dicho lingote no está ya a dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente después del paso (c), calentar adicionalmente dicho lingote hasta dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente
45

lista para mecanizado en caliente.

Una forma o aspecto ilustrativo está basada en la observación de que pueden impartirse propiedades metalúrgicas equivalentes o idénticas a las obtenidas durante la homogeneización convencional de un lingote de metal colado (un procedimiento que requiere varias horas de calentamiento a una temperatura elevada) a dicho lingote dejando que las temperaturas de la corteza enfriada y el interior todavía fundido de un lingote de colada embrionario converjan a una temperatura igual o superior a la temperatura de transformación del metal a la que ocurre la homogeneización *in situ* del metal, que es generalmente una temperatura de al menos 425°C para muchas aleaciones de aluminio, y preferiblemente se mantengan a o cerca de dicha temperatura durante un periodo de tiempo adecuado para que
55 ocurran (al menos en parte) las transformaciones deseadas.

Sorprendentemente, los cambios metalúrgicos deseables pueden impartirse a menudo de este modo en un tiempo relativamente corto (v.g. de 10 a 30 minutos) y el procedimiento para conseguir dicho resultado puede incorporarse en la operación de colada propiamente dicha, evitando con ello la necesidad de un paso de homogeneización adicional costoso e inconveniente. Sin desear quedar ligados por ninguna teoría particular, es posible que esto sea debido a la creación o mantenimientos de cambios metalúrgicos deseables a medida que la aleación se somete a colada por un efecto significativo de retrodifusión (en uno cualquiera o ambos estados sólido y líquido y su forma combinada 'pastosa') durante un periodo de tiempo breve en lugar de tener las propiedades metalúrgicas indeseables que resultan durante el enfriamiento convencional, que requieren luego un tiempo considerable para corrección en un paso de homogeneización convencional.

Incluso en aquellos casos en los que la homogeneización no se realiza normalmente con un lingote colado de manera convencional, pueden lograrse mejoras en propiedades que hacen el lingote más fácil de procesar o proporcionan un producto con propiedades mejoradas.

El método de colada que implica homogeneización *in situ* como se ha expuesto arriba puede ir seguido opcionalmente por una operación de apagado antes de retirar el lingote del aparato de colada, v.g. por inmersión de la parte delantera del lingote de colada que avanza en un baño de líquido refrigerante. Esto se lleva a cabo después de la retirada del líquido refrigerante suministrado a la superficie del lingote embrionario y después que se ha dejado transcurrir un tiempo suficiente para las transformaciones metalúrgicas adecuadas.

El término "homogeneización *in situ*" ha sido acuñado por los inventores para describir este fenómeno por el cual se consiguen cambios microestructurales durante el proceso de colada que son equivalentes a los obtenidos por homogeneización convencional realizada después de colada y enfriamiento. Análogamente, el término "apagado *in situ*" ha sido acuñado para describir un paso de apagado realizado después de la homogeneización *in situ* durante el proceso de colada.

Debe indicarse que las realizaciones pueden aplicarse a la colada de lingotes compuestos de dos o más metales (o del mismo metal procedente de dos fuentes diferentes), v.g. como se describe en la publicación de patente U.S. 2005-0011630 publicada el 20 de enero de 2005 o la patente U.S. 6.705.384 que fue expedida el 16 de marzo de 2004. Los lingotes de material compuesto de esta clase se fabrican por colada de modo muy similar a los lingotes monolíticos hechos de un solo metal, pero el molde de colada o análogo tiene dos o más entradas separadas por una pared de molde interna o por una alimentación continua de una cinta de metal sólido que se incorpora en el lingote colado. Una vez retirado del molde, a través de una o más salidas, el lingote de material compuesto se somete a refrigeración por líquido y el refrigerante líquido puede retirarse del mismo modo que en el caso de un lingote monolítico con efecto igual o equivalente.

Así pues, ciertas realizaciones ilustrativas pueden proporcionar un método de colada de un lingote metálico, que comprende los pasos de: (a) suministrar metal fundido procedente de al menos una fuente a una región en la que el metal fundido está confinado periféricamente, proporcionando con ello al metal fundido una porción periférica; (b) enfriar la porción periférica del metal, formando con ello un lingote embrionario que tiene una corteza externa sólida y un núcleo interno fundido; (c) hacer avanzar el lingote embrionario en una dirección de avance alejada de la región en la que el metal fundido está confinado periféricamente mientras se suministra metal fundido adicional a la región, ampliando con ello el núcleo fundido contenido dentro de la corteza sólida más allá de la región; (d) enfriar una superficie externa del lingote embrionario que emerge de la región en la que el metal está confinado periféricamente dirigiendo un suministro de líquido refrigerante sobre la superficie exterior; y (e) retirar una cantidad efectiva (y, muy preferiblemente, la totalidad) del líquido refrigerante de la superficie exterior del lingote embrionario en una localización de la superficie exterior del lingote en la que una sección transversal del lingote perpendicular a la dirección de avance corta una porción del núcleo fundido de tal modo que el calor interno del núcleo fundido recalienta la corteza sólida adyacente al núcleo fundido después de la retirada de la cantidad eficaz de refrigerante, haciendo con ello que las temperaturas del núcleo y la corteza se aproximen cada una a una temperatura de convergencia de 425°C o mayor.

Esta convergencia puede, en casos preferidos, rastrearse por medida de la superficie exterior del lingote que muestra un rebote de temperatura después que se ha retirado el líquido refrigerante. Esta temperatura de rebote alcanzaría un máximo por encima de la temperatura de transformación de la aleación o fase, y preferiblemente por encima de 426°C.

En el método anterior, el metal fundido en el paso (a) se suministra preferiblemente a al menos una entrada de un molde de colada directa en coquilla, formando con ello el molde de colada directa en coquilla la región en la que el metal fundido está confinado periféricamente, y el lingote embrionario se hace avanzar en el paso (c) desde al menos una salida del molde de colada directa en coquilla, estando separada la localización en la superficie exterior del lingote en la que la porción sustancial de líquido refrigerante se retira en el paso (e) a cierta distancia de la al menos una salida del molde. El método de colada (es decir el suministro del metal fundido) puede ser continuo o semi-continuo, según se desee.

El líquido refrigerante puede retirarse de la superficie exterior por frotamiento u otros medios. Preferiblemente, se proporciona un contacto deslizante que rodea el lingote y la posición del contacto deslizante puede modificarse, si se

desea, durante las diferentes fases de la operación de colada, v.g. para minimizar las diferencias de la temperatura de convergencia que pueden producirse en caso contrario durante tales fases diferentes.

5 Conforme a otra realización ilustrativa, se proporciona un aparato para colada directa semicontinua o continuamente en coquilla de un lingote metálico, que comprende: un molde de colada que tiene al menos una entrada, al menos una salida y al menos una cavidad de molde; al menos una camisa de refrigeración para la al menos una cavidad de molde; un suministro de líquido refrigerante dispuesto para hacer que el líquido refrigerante fluya a lo largo de una superficie exterior de un lingote embrionario que emerge desde al menos una salida; medios separados a cierta distancia de la al menos una salida para retirar el líquido refrigerante de la superficie exterior del lingote embrionario; y un aparato para mover los medios de retirada del refrigerante hacia y en sentido de alejamiento de la al menos una salida, haciendo posible con ello que la distancia se modifique durante la colada del lingote.

10 Otra realización ilustrativa proporciona un método de producción de un artículo de chapa metálica, que incluye producir un lingote metálico solidificado por un método como se ha descrito arriba; y mecanizar en caliente el lingote para producir un artículo mecanizado; caracterizado porque la mecanizado en caliente se lleva a cabo sin homogeneización del lingote metálico solidificado entre el paso de producción del lingote (a) y el paso de mecanizado en caliente (b). La mecanizado en caliente puede ser, por ejemplo, laminación en caliente, y ésta puede ir seguida por laminación convencional en frío, en caso deseado. El término "mecanizado en caliente" puede incluir, por ejemplo, procesos tales como laminación en caliente, extrusión y forja.

15 Otra realización ilustrativa proporciona un método de producción de un lingote metálico que puede ser mecanizado en caliente sin homogeneización previa, método que comprende colar un metal para formar un lingote en condiciones de temperatura y tiempo eficaces para producir un metal solidificado que tiene una microestructura *sin núcleo*, o, alternativamente, una microestructura fracturada (las partículas intermetálicas que se exhiben están fracturadas en la estructura colada).

20 Al menos en algunas de las realizaciones ilustrativas, se deja que los elementos de soluto que se segregan durante la solidificación hacia el borde de la célula, que existen en el borde del lingote, cerca de la superficie apagada por debajo de una temperatura de transformación, v.g. una temperatura del solvus, durante la refrigeración inicial del fluido, se redistribuyan por difusión en estado sólido a través de la dendrita/célula y aquellos elementos del soluto que se segregan normalmente hacia el borde de la dendrita/célula en la región central del lingote disponen de tiempo y temperatura durante la solidificación para retro-difusión del soluto desde el líquido homogéneo de regreso a la dendrita/célula antes de crecimiento y engrosamiento. El resultado de esta retrodifusión retira elementos del soluto de la mixtura homogénea, generando una concentración reducida de soluto en la mixtura homogénea, que minimiza a su vez la fracción en volumen de los compuestos intermetálicos colados en el límite de unidad dendrita/célula reduciendo con ello el efecto de macro-segregación global a través del lingote. Cualesquiera constituyentes y fases intermetálicas de la pieza colada de punto de fusión alto en dicho punto se modifican fácilmente, una vez solidificados, por la difusión en masa del silicio (Si) u otros elementos presentes en el metal, a las temperaturas elevadas, produciendo una región desnuda en el límite dendrita/célula equivalente a o próxima a la concentración correspondiente al límite máximo de solubilidad para dicha temperatura particular de convergencia. Análogamente, las eutécticas de punto de fusión alto (o constituyentes metaestables e intermetálicos) pueden modificarse adicionalmente o pueden modificarse/transformarse ulteriormente en estructura si la temperatura de convergencia se alcanza y se mantiene en una región de fase mixta común a dos regiones de fase binaria adyacentes. Además de esto, los constituyentes y fases intermetálicas colados con punto de fusión nominalmente más alto pueden fracturarse y/o redondearse, y los constituyentes y fases intermetálicas de colados de punto de fusión bajo tienen mayor probabilidad de fundirse o difundirse en el material en masa durante el proceso de colada.

25 Otra realización ilustrativa proporciona un método de calentamiento de un lingote metálico colado para preparar el lingote para la mecanizado en caliente a una temperatura de mecanizado en caliente predeterminada. El método implica (a) precalentar el lingote a una temperatura de formación de núcleo, por debajo de la temperatura de mecanizado en caliente predeterminada, a la cual ocurre una nucleación de precipitado en el metal para hacer que tenga lugar la nucleación; (b) calentar adicionalmente el lingote a una temperatura de crecimiento de precipitado a la cual tiene lugar el crecimiento del precipitado para causar el crecimiento del precipitado en el metal; y (c) si el lingote no se encuentra ya a la temperatura de mecanizado en caliente predeterminada después del paso (b), calentar adicionalmente el lingote a dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente para que tenga lugar la mecanizado en caliente. El paso de mecanizado en caliente comprende preferiblemente laminación en caliente, y el lingote se fabrica preferiblemente por colada DC.

30 Conforme a este método, se producen dispersoides, formados comúnmente durante la homogeneización y la laminación en caliente, de tal manera que, durante el precalentamiento del lingote en dos etapas a una temperatura de laminación en caliente y mantenimiento durante cierto periodo de tiempo, el tamaño y la distribución de la población de dispersoides en el lingote llega a ser similar a o mejor que el que se encuentra normalmente después de un proceso de homogeneización total, pero en un periodo de tiempo sustancialmente más corto.

35 Preferiblemente, este método proporciona un proceso para procesamiento térmico de un lingote metálico que comprende los pasos de:

- (a) precalentar un lingote a una temperatura correspondiente a una composición del solvus en la que,
- (b) la porción de material sobresaturado que precipita de la solución durante el calentamiento contribuye a la nucleación de un precipitado,
- (c) mantener el lingote a dicha temperatura durante cierto periodo de tiempo y luego,
- 5 (d) aumentar la temperatura del lingote hasta una temperatura que corresponde a una composición del solvus y,
- (e) dejar que la porción del material sobresaturado que precipita de la solución en la segunda etapa se caliente para contribuir al crecimiento de un precipitado, y finalmente,
- 10 (f) mantener el lingote a dicha temperatura durante un periodo de tiempo que permita la difusión continuada del soluto desde los precipitados más pequeños (térmicamente inestables) que mejoran el crecimiento de los precipitados de mayor tamaño más estables o, alternativamente, aumentar gradualmente la temperatura, aumentando con ello la concentración del soluto que contribuye al crecimiento sin requerir un mantenimiento a temperatura.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

15 Fig. 1 es una sección transversal vertical de un molde de colada directa en coquilla que muestra una forma preferida de un proceso conforme a una realización ilustrativa, y que ilustra particularmente un caso en el que el lingote se mantiene caliente durante toda la colada.

Fig. 2 es una sección transversal similar a la descrita en Fig. 1, que ilustra una modificación preferida en la cual la posición del contacto deslizante puede desplazarse durante la colada.

20 Fig. 3 es una sección transversal similar a la de Fig. 1, que ilustra un caso en el que el lingote se enfría adicionalmente (se apaga) en el extremo inferior durante la colada.

Fig. 4 es una vista en planta desde arriba de un lingote de colada en forma de J que ilustra una forma preferida de una realización ilustrativa.

25 Fig. 5 es un gráfico que muestra las distancias X de Fig. 1 para un molde del tipo que se muestra en Fig. 4, correspondiendo los valores de X a puntos situados alrededor de la periferia del molde medidos en la dirección de las agujas del reloj desde el punto S en Fig. 4.

Fig. 6 es una vista en perspectiva de un contacto deslizante diseñado para el molde de colada de Fig. 4.

30 Fig. 7 es un gráfico que ilustra un procedimiento de colada conforme a una forma de una realización ilustrativa, que muestra la temperatura de la superficie y la temperatura del núcleo a lo largo del tiempo de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu a medida que la misma se produce por colada DC y se somete luego a enfriamiento con agua y frotamiento con un líquido refrigerante. La historia térmica en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu similar a la de la Patente US 6.019.939 en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado (la traza de temperatura inferior es la superficie, y la traza superior (de guiones) es el centro).

35 Fig. 8 es un gráfico que ilustra la misma operación de colada que Fig. 7, pero que se prolonga durante un periodo de tiempo más prolongado y muestra en particular el periodo de enfriamiento después de convergencia o rebote de temperatura.

40 Fig. 9 es un gráfico similar a Fig. 7 pero que muestra las medidas de temperatura de la misma pieza colada realizadas en tres momentos ligeramente diferentes (longitudes diferentes de lingote como se muestra en la figura). Las líneas de trazo continuo muestran las temperaturas de la superficie de las tres gráficas, y las líneas de puntos muestran las temperaturas del núcleo. Los tiempos durante los cuales las temperaturas de la superficie se mantienen por encima de 400°C y 500°C pueden determinarse a partir de cada gráfica y son mayores que 15 minutos en cada caso. Se muestran para cada caso las temperaturas de rebote de 563, 581 y 604°C.

45 Fig. 10a muestra micrografías electrónicas de transmisión de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu similar a la de la Patente US No. 6.019.939 con una historia de solidificación y enfriamiento conforme al Proceso Comercial de Coquilla Directo, y la historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la Muestra A en el Ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.

50 Fig. 10b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa de Fig. 10a, pero presentada en luz polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.

- 5 Fig. 11a muestra micrografías electrónicas de transmisión de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu, similar a la de la patente US No. 6.019.939 con una historia de solidificación y enfriamiento conforme al Proceso Comercial de Coquilla Directo, y la historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la Muestra B del Ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.
- Fig. 11b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa que Fig. 11a, pero representada en luz polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.
- 10 Fig. 12a muestra micrografías electrónicas de transmisión de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu, similar a la de la patente US No. 6.019.939 con una historia de solidificación y enfriamiento conforme a Fig. 7 y Fig. 8, e historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la muestra C del ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.
- Fig. 12b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa que Fig. 12a, pero representada en luz ópticamente polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.
- 15 Fig. 13a muestra micrografías electrónicas de transmisión de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu similar a la de la patente US No. 6.019.939 con historia de solidificación y enfriamiento conforme a Fig. 9, y una historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la muestra D del ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.
- Fig. 13b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa que Fig. 13a, pero representada en luz polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.
- 20 Fig. 14a muestra micrografías electrónicas de transmisión de una aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu similar a la de la patente US No. 6.019.939 con una historia de solidificación y enfriamiento conforme al Proceso comercial de Colada Directa, e historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la muestra E del Ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.
- Fig. 14b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa de Fig. 14a, pero presentada en luz polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.
- 25 Fig. 15a muestra micrografías electrónicas de transmisión de aleación Al-1,5%Mn-0,6%Cu, similar a la de la patente US No. 6.019.939 con una historia de solidificación y enfriamiento conforme al Proceso de Colada Directa comercial, e historia de procesamiento térmico y mecánico conforme a la muestra F del Ejemplo siguiente, mostrando la población típica de precipitado para 6 mm de espesor, encontrada a 25 mm de la superficie y el centro del lingote.
- 30 Fig. 15b es una fotomicrografía de la misma área en la chapa de Fig. 15a, pero presentada en luz polarizada para revelar el tamaño de la célula recristalizada.
- Fig. 16 es una micrografía electrónica de barrido con Barrido de la Línea de Cobre (Cu) de Al-4,5%Cu a través del centro de una estructura de grano solidificado que muestra la microsegregación típica común al proceso Convencional de Colada Directa en Coquilla.
- 35 Fig. 17 es una Imagen SEM de Barrido de la Línea de Cobre (Cu) de Al-4,5%Cu con un contacto deslizante y una temperatura de rebote/convergencia (300°C) en el intervalo propuesto por Ziegler, 2.705.353 o Zinniger, 4.237.961.
- Fig. 18 es una Imagen SEM con Barrido de la Línea de Cobre (Cu) de Al-4,5%Cu conforme a una realización ilustrativa en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado (véase Fig. 19).
- 40 Fig. 19 es un gráfico que ilustra la historia térmica de una aleación Al-4,5%Cu en la región en que la solidificación y el recalentamiento tienen lugar en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado (véase Fig. 18).
- Fig. 20 es una imagen SEM con Barrido de la Línea de Cobre (Cu) de Al-4,5%Cu conforme a una realización ilustrativa, en el caso en que la masa del lingote se somete a enfriamiento forzado después de un retardo intencionado (véase Fig. 21).
- 45 Fig. 21 es un gráfico que muestra la historia térmica en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento de una aleación Al-4,5%Cu en el caso en que la masa del lingote se somete a enfriamiento forzado después de un retardo intencionado (véase Fig. 20).
- Fig. 22 es un gráfico que muestra fracciones de área representativas de fases intermetálicas coladas comparadas a través de tres rutas de procesamiento diversas.
- 50 Fig. 23 es un gráfico que ilustra la historia térmica en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento de una aleación Al-0,5% Mg-0,45% Si (6063) en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado.

Fig. 24 es un gráfico que ilustra la historia térmica en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento de una aleación Al-0,5 Mg-0,45 Si (AA6063) en el caso en que la masa del lingote se somete a enfriamiento forzado después de un retardo intencionado.

5 Figs. 25a, 25b y 25c son cada una patrones de difracción de la aleación tratada conforme a Fig. 23 y Fig. 24 es una identificación de fase XRD.

Figs. 26a, 26b y 26c son cada una representaciones gráficas de técnicas FDC realizadas sobre los lingotes colados convencionalmente, y tratados también conforme a los procedimientos de Figs. 23 y 24.

Figs. 27a y 27b son fotomicrografías ópticas de una aleación intermetálica Al-1,3%Mn tal como resulta de la colada (AA3003) procesada conforme a una realización ilustrativa, fracturada.

10 Fig. 28 es una fotomicrografía óptica de una aleación intermetálica Al-1,3%Mn tal como resulta de la colada, procesada conforme a una realización ilustrativa, y modificada;

Fig. 29 es una micrografía electrónica de transmisión de una fase intermetálica tal como resulta de la colada, colada conforme a esta realización ilustrativa, y modificada por difusión de Si en la partícula, mostrando una zona desnuda;

Fig. 30 es una gráfica que ilustra la historia térmica de una aleación Al-7% Mg procesada convencionalmente;

15 Fig. 31 es un gráfico que ilustra la historia térmica de una aleación Al-7% Mg en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado con una temperatura de rebote que es inferior a la temperatura de disolución para la fase beta (β);

20 Fig. 32 es un gráfico que ilustra la historia térmica de una aleación Al-7% Mg en la región en que tienen lugar la solidificación y el recalentamiento en el caso en que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado con una temperatura de rebote que es superior a la temperatura de disolución para la fase beta (β);

Fig. 33 es la traza de salida de un Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC) que muestra la presencia de fase beta (β) en el intervalo 451-453°C (Material de Colada Directa en Coquilla Convencional) (véase Fig. 30);

Fig. 34 es la traza de salida de un Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC) que muestra la ausencia de fase beta (β) (véase Fig. 31); y

25 Fig. 35 es la traza de salida de un Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC), traza que muestra la ausencia de fase beta (β) (véase Fig. 32).

MODOS ÓPTIMOS PARA REALIZACIÓN DE LA INVENCION.

30 La descripción que sigue se refiere a la colada directa en coquilla de aleaciones de aluminio, pero solamente como ejemplo. La presente realización ilustrativa es aplicable a diversos métodos de colada de lingotes metálicos, a la colada de la mayoría de las aleaciones, particularmente aleaciones de metal ligero, y especialmente aquellas que tienen una temperatura de transformación superior a 450°C y que requieren homogeneización después de la colada y antes de la mecanizado en caliente, v.g., laminación. Además de aleaciones basadas en aluminio, ejemplos de otros metales que pueden ser colados incluyen aleaciones basadas en magnesio, cobre, cinc, plomo-estaño y hierro. La realización ilustrativa puede ser aplicable también a la colada de aluminio u otros metales puros en los cuales pueden conseguirse los efectos de uno de los cinco resultados del proceso de homogeneización (véase arriba la descripción de estos pasos).

40 Fig. 1 de los dibujos que se acompañan muestra una sección transversal vertical simplificada de un ejemplo de un fundidor DC 10 vertical que puede utilizarse para llevar a cabo al menos parte de un proceso conforme a una forma ilustrativa de la presente realización ilustrada. Por supuesto, se comprenderá por las personas expertas en la técnica que un fundidor de este tipo podría formar parte de un grupo mayor de fundidores, todos los cuales operen simultáneamente de igual manera, v.g. formando parte de una mesa de fundición múltiple.

45 El metal fundido 12 se introduce en un molde 14 refrigerado por agua orientado verticalmente a través de una entrada de molde 15 y emerge como un lingote embrionario 16 desde una salida del molde 17. El lingote embrionario tiene un núcleo de metal líquido 24 dentro de una corteza exterior sólida 26 que engrosa a medida que se enfría el lingote embrionario (como se muestra por la línea 19) hasta que se produce un lingote de colada totalmente sólido. Se comprenderá que el molde 14 encierra y enfría periféricamente el metal fundido para comenzar la formación de la corteza sólida 26, y el metal que se enfría se desplaza y se aleja del molde en una dirección de avance indicada por la flecha A? en Fig. 1. Los chorros 18 de líquido refrigerante están dirigidos a la superficie exterior del lingote a medida que éste emerge del molde a fin de mejorar el enfriamiento y mantener el proceso de solidificación. El líquido refrigerante es normalmente agua, pero puede utilizarse posiblemente otro líquido, v.g. etilenglicol, para aleaciones especiales tales como las aleaciones aluminio-litio. El flujo de refrigerante empleado puede ser totalmente normal para la colada DC, v.g. 1,04 litros por minuto y por centímetro de periferia a 1,78 litros por minuto y por centímetro de periferia (0,7 galones por minuto (gpm)/pulgada de periferia a 1,2 gpm /pulgada).

Un contacto deslizante anular 20 está provisto en contacto con la superficie exterior del lingote separado a una distancia X por debajo de la salida 17 del molde, y éste tiene el efecto de retirar el líquido refrigerante (representado por las corrientes 22) de la superficie del lingote a fin de que la superficie de la parte del lingote por debajo del contacto deslizante esté exenta de líquido refrigerante a medida que el lingote continúa descendiendo. Las corrientes 22 de refrigerante se muestran fluyendo desde el contacto deslizante 20, pero las mismas están espaciadas a cierta distancia de la superficie del lingote 16 de tal modo que no proporcionan un efecto de enfriamiento.

La distancia X está calculada de tal modo que la separación del líquido refrigerante del lingote tiene lugar mientras el lingote es todavía embrionario (es decir, el mismo contiene todavía el centro líquido 24 contenido dentro de la corteza sólida 26). Expuesto de otro modo, el contacto deslizante 20 está posicionado en un punto en el que una sección transversal del lingote tomada perpendicularmente a la dirección de avance A corta una porción del núcleo de metal líquido 24 del lingote embrionario. En posiciones inferiores a la superficie superior del contacto deslizante 20, el enfriamiento y la solidificación continuados del metal fundido dentro del núcleo del lingote libera calor latente de solidificación y calor sensible a la corteza sólida 26. Esta transferencia de calor latente y sensible, con la ausencia de enfriamiento forzado continuado (líquido), hace que la temperatura de la corteza sólida 26 (por debajo de la posición en la que el contacto deslizante 20 retira el refrigerante) aumente (comparada con su temperatura inmediatamente por encima del contacto deslizante) y converja con la del núcleo fundido a una temperatura que está establecida de modo que sea superior a una temperatura de transformación a la cual el metal sufre homogeneización *in situ*. Al menos para las aleaciones de aluminio, la temperatura de convergencia está fijada generalmente de modo que sea igual o superior a 425°C, y más preferiblemente igual o superior a 450°C. Por razones prácticas en términos de medida de la temperatura, la "temperatura de convergencia" (la temperatura común alcanzada por primera vez por el núcleo fundido y la corteza sólida) se considera que es igual a la "temperatura de rebote" que es la temperatura máxima a la cual la corteza sólida se eleva en este proceso después de la retirada del líquido refrigerante.

Puede hacerse que la temperatura de rebote sea lo más alta posible por encima de 425°C, y generalmente cuanto mayor sea la temperatura tanto mejor es el resultado deseado de homogeneización *in situ*, pero la temperatura de rebote no se elevará, por supuesto, hasta el punto de fusión incipiente del metal dado que la corteza exterior 26 enfriada y solidificada absorbe calor del núcleo e impone un techo a la temperatura de rebote. De paso, se mencionará que la temperatura de rebote, que es por regla general al menos 425°C, será normalmente superior a la temperatura de recocido del metal (las temperaturas de recocido para las aleaciones de aluminio están comprendidas típicamente en el intervalo de 343 a 415°C).

La temperatura de 425°C es una temperatura crítica para la mayoría de las aleaciones dado que, a temperaturas inferiores, las tasas de difusión de los elementos metálicos dentro de la estructura solidificada son demasiado lentas para normalizar o igualar la composición química de la aleación a través del grano. A esta temperatura y por encima de ella, y particularmente a y por encima de 450°C, las tasas de difusión son adecuadas para producir una equalización deseada a fin de causar un efecto deseable de homogeneización del metal *in situ*.

De hecho, a menudo es deseable asegurar que la temperatura de convergencia alcanza cierta temperatura mínima por encima de 425°C. Para cualquier aleación particular, existe usualmente una temperatura de transición entre 425°C y el punto de fusión de la aleación, por ejemplo una temperatura del solvus o una temperatura de transformación, por encima de la cual tienen lugar cambios microestructurales de la aleación, v.g. conversión de constituyentes de fase β en fase α o estructuras intermetálicas. Si la temperatura de convergencia se fija de modo que exceda tales temperaturas de transformación, pueden introducirse cambios de transformación deseados en la estructura de la aleación.

La temperatura de rebote o convergencia está determinada por los parámetros de la colada y, en particular, por el posicionamiento del contacto deslizante 20 por debajo del molde (es decir, la dimensión de la distancia X en Fig. 1). La distancia X debería seleccionarse preferiblemente de tal modo que: (a) exista suficiente metal líquido remanente en el núcleo después de la retirada del refrigerante, y suficiente exceso de temperatura (sobrecalentamiento) y calor latente del metal fundido, para permitir que las temperaturas del núcleo y la corteza alcancen la temperatura de convergencia deseada arriba indicada; (b) el metal se exponga a una temperatura superior a 425°C durante un tiempo suficiente después de la retirada del refrigerante para permitir que tengan lugar los cambios microestructurales deseados a las tasas normales de enfriamiento en el aire a las velocidades de colada normales; y (c) se exponga el lingote al líquido refrigerante (es decir, antes de la retirada del líquido refrigerante) durante un tiempo suficiente para solidificar la corteza en una proporción que establezca el lingote e impida el sangrado o la fuga de metal fundido desde el interior.

Usualmente es difícil posicionar el contacto deslizante 20 a menos de 50 mm de la salida del molde 17 mientras se deja espacio suficiente para refrigeración del líquido y solidificación de la corteza, por lo que éste es generalmente el límite inferior práctico (dimensión mínima) para la distancia X. En la práctica, se ha encontrado que el límite superior (dimensión máxima) es aproximadamente 150 mm, con indiferencia del tamaño del lingote, a fin de alcanzar las temperaturas de rebote deseadas, y el intervalo preferido para la distancia X es normalmente 50 mm a 100 mm. La posición óptima del contacto deslizante puede variar de una aleación a otra y de un equipo de colada a otro equipo de colada (dado que los lingotes de tamaños diferentes pueden colarse a velocidades de colada diferentes), pero siempre es superior a la posición a la cual el núcleo del lingote se vuelve completamente sólido. Una posición (o

intervalo de posiciones) adecuada(o) puede determinarse para cada caso por cálculo (utilizando ecuaciones de generación de calor y pérdida de calor), o por medidas de temperatura de la superficie (v.g., utilizando termopares estándar incrustados en la superficie o como sondas superficiales con o sin contacto), o por tanteos. Para moldes de colada DC de capacidad normal que formen un lingote de 10 a 60 cm de diámetro, se emplean normalmente velocidades de colada de al menos 40 mm/minuto, más preferiblemente 50 a 75 mm/min (o $9,0 \times 10^{-4}$ hasta $4,0 \times 10^{-3}$ metros/segundo).

En algunos casos, es deseable hacer que la distancia X varíe en diferentes momentos durante un procedimiento de colada, v.g. haciendo que el contacto deslizante móvil 20 esté más próximo al molde 14 o más alejado del molde. Esto tiene por objeto acomodar las diferentes condiciones térmicas encontradas durante las fases transitorias al principio y al final del procedimiento de colada.

Al principio de la colada, un bloque de fondo obstruye la salida del molde y se hace descender gradualmente para iniciar la formación del lingote de colada. Se produce una pérdida de calor desde el lingote al bloque de fondo (que está hecho normalmente de un metal termoconductor) así como desde la superficie exterior del lingote emergente. Sin embargo, a medida que avanza la colada y la parte emergente del lingote llega a separarse del bloque de fondo a una distancia creciente, se pierde calor sólo desde la superficie exterior del lingote. Al final de la colada, puede ser deseable hacer que la corteza exterior esté más fría de lo normal inmediatamente antes de terminar la colada. Esto es debido a que la última parte del lingote que emerge del molde está normalmente sujeta por un dispositivo de elevación a fin de que el lingote entero pueda levantarse. Si la corteza está más fría y es más gruesa, es menos probable que el dispositivo de sustentación pueda causar deformación o rotura que pueda poner en peligro la porción de levantamiento. Para conseguir esto, la tasa de flujo del líquido refrigerante puede aumentarse al final de la fase de colada.

En la fase de puesta en marcha, se retira más calor del lingote que durante la fase normal de la colada, debido a la pérdida de calor al bloque de fondo. En tal caso, el contacto deslizante puede desplazarse temporalmente más próximo al molde a fin de acortar el periodo de tiempo que la superficie del lingote se ve expuesta al agua de refrigeración, reduciendo así la extracción de calor. Después de cierto tiempo, el contacto deslizante puede relocalizarse en su posición normal para la fase normal de la colada. En la fase final, se encuentra en la práctica que puede no ser necesario movimiento alguno del contacto deslizante pero, si es preciso, el contacto deslizante puede elevarse para compensar el calor adicional retirado por la tasa incrementada de flujo del líquido refrigerante.

La distancia a lo largo de la cual se mueve el contacto deslizante (variación en X, es decir ΔX) y los tiempos en que se realizan los movimientos pueden calcularse por ecuaciones teóricas de pérdida de calor, evaluarse por tanteos, o (más preferiblemente) basarse en la temperatura de la superficie del lingote por encima (o posiblemente por debajo) del contacto deslizante, determinada por un sensor apropiado. En el último caso, una temperatura anormalmente baja de la superficie puede indicar la necesidad de un acortamiento de la distancia X (menos enfriamiento) y una temperatura anormalmente alta de la superficie puede indicar la necesidad de un alargamiento de la distancia X (más enfriamiento). Un sensor adecuado para este propósito se describe en la Patente U.S. 6.012.507 expedida el 11 de enero 2000 a Marc Auger et al. (cuya descripción se incorpora en esta memoria por referencia).

Al comienzo de la colada, se requiere por regla general el ajuste de la posición del contacto deslizante sólo para los primeros 50 cm a 60 cm del procedimiento de colada. Pueden hacerse varios pequeños cambios incrementales, v.g. para una distancia de 25 mm en cada caso. Para un lingote de 68,5 cm de espesor, el primer ajuste puede tener lugar dentro de 150-300 mm del comienzo del lingote, después de lo cual pueden hacerse variaciones similares a 30 cm y 50-60 cm. Para un lingote de 50 cm de espesor, los ajustes pueden hacerse a 15 cm, 30 cm, 50 cm y 80 cm. La posición final del contacto deslizante es la requerida para el procedimiento de colada normal, por lo que el contacto deslizante comienza en el punto más próximo al molde y se desplaza luego hacia abajo a medida que transcurre la colada. Esto aproxima la reducción de la pérdida de calor a medida que la parte emergente del lingote llega a separarse más del bloque de fondo mientras progresa la colada. La distancia X comienza así a una distancia más corta que en la fase de colada normal, y se alarga gradualmente hasta la distancia requerida para la colada normal.

Al final de la colada, si se requiere cualquier ajuste, ello puede hacerse dentro de los 25 cm finales de la colada, y normalmente existe necesidad de un solo ajuste en 1 a 2 centímetros.

El ajuste de la posición del contacto deslizante puede hacerse manualmente (v.g. si el contacto deslizante está soportado por cadenas que tienen eslabones u ojetas a través de los cuales se insertan proyecciones (v.g. ganchos) en el contacto deslizante, el contacto deslizante puede estar soportado y elevarse de tal manera que las proyecciones puedan insertarse a través de eslabones u ojetas diferentes). Alternativamente, y de modo más preferible, el contacto deslizante puede estar soportado y moverse por medio de gatos eléctricos, neumáticos o hidráulicos conectados opcionalmente por computadora (o equivalente) a un aparato sensor de temperatura del tipo arriba mencionado de tal modo que el contacto deslizante pueda moverse conforme a un bucle de realimentación con lógica incorporada. Una configuración de este tipo se muestra de forma simplificada en Fig. 2.

El aparato representado en Fig. 2 es similar al de Fig. 1, excepto que el contacto deslizante 20 es ajustable en altura, v.g. desde una posición superior representada en líneas de trazo continuo a una posición inferior

representada en líneas quebradas. Así pues, la distancia X desde la salida del molde 14 puede modificarse en ΔX (hacia arriba o hacia abajo). Esta susceptibilidad de ajuste es posible debido a que el contacto deslizante 20 está sustentado por soportes ajustables 21 que son dispositivos hidráulicos de pistón y cilindro accionados por un motor hidráulico 23. El motor hidráulico 23 está controlado a su vez por una computadora 25 basada en información de temperatura suministrada por un sensor de temperatura 27 que monitoriza la temperatura de la superficie del lingote 16 inmediatamente por debajo de la salida 17 del molde 14. Como se ha indicado arriba, si la temperatura registrada por el sensor 27 es menor que un valor predeterminado, el contacto deslizante 20 puede elevarse, y si la temperatura es superior a un valor predeterminado, el contacto deslizante puede hacerse bajar.

Deseablemente, en todas las formas de las realizaciones ilustrativas, la temperatura de convergencia del lingote por debajo del contacto deslizante 20 debería mantenerse por encima de la temperatura de transformación para la homogeneización *in situ* (generalmente por encima de 425°C) durante un periodo de tiempo suficiente para permitir que tengan lugar las transformaciones micro-estructurales deseadas. El tiempo exacto dependerá de la aleación, pero preferiblemente está comprendido en el intervalo de 10 minutos a 4 horas dependiendo de las velocidades de difusión elementales y del grado en que la temperatura de rebote se eleve por encima de 425°C. Normalmente, los cambios deseables han tenido lugar después de no más de 30 minutos, y a menudo en el intervalo de 10 a 15 minutos. Esto está en contraste acusado con el tiempo requerido para la homogeneización convencional de una aleación, que normalmente está comprendido en el intervalo de 46 a 48 horas a temperaturas superiores a una temperatura de transformación (v.g. solvus) del metal (a menudo 550 a 625°C). A pesar del tiempo muy reducido del proceso de las realizaciones ilustrativas comparado con la homogeneización convencional, la microestructura resultante del metal es esencialmente la misma en ambos casos, es decir que el producto colado de las realizaciones ilustrativas tiene la microestructura de un metal homogeneizado sin haber sufrido homogeneización convencional, y puede laminarse o mecanizarse en caliente sin homogeneización adicional. La presente realización ilustrativa de la invención se conoce por tanto como "homogeneización *in situ*", es decir homogeneización producida durante la colada en lugar de posteriormente.

Como resultado de la aplicación del líquido refrigerante y la retirada subsiguiente, la superficie del lingote emergente se somete primeramente al enfriamiento rápido característico de los regímenes de ebullición en film y film nucleado, asegurando con ello que la temperatura de la superficie se reduce rápidamente a un nivel bajo (v.g., 150°C a 300°C), pero está sujeta luego a la retirada del líquido refrigerante, permitiendo con ello que el exceso de temperatura y calor latente del centro fundido del lingote (así como el calor sensible del metal sólido) recalienten la superficie de la corteza sólida. Esto asegura que se alcancen las temperaturas necesarias para las transiciones microestructurales deseadas.

Debe indicarse que, si se deja que el fluido refrigerante entre en contacto con el lingote durante un tiempo más prolongado que el deseable antes de ser retirado de la superficie del lingote (o si el refrigerante no se retira en absoluto), ya no es posible hacer uso del efecto sustancial del sobrecalentamiento y el calor latente de solidificación del núcleo fundido para recalentar la corteza del lingote lo bastante para conseguir los cambios metalúrgicos deseados. Si bien podría existir cierto equilibrio de temperatura a través del lingote con un procedimiento de este tipo, y aunque esto podría dar posiblemente como resultado una reducción beneficiosa de tensiones y reducción del agrietamiento, no se obtienen los cambios metalúrgicos deseados y podría requerirse entonces un procedimiento de homogeneización convencional adicional antes de laminar los lingotes a un espesor o calibre deseado. El mismo problema puede presentarse si el refrigerante se retira de la superficie del lingote de la manera deseada, y se pone luego en contacto refrigerante adicional con el lingote antes que hayan tenido lugar la equilibración de temperatura en todo el lingote, y los cambios micro-estructurales deseados en el interior del metal.

En algunos casos, el refrigerante (particularmente refrigerante basado en agua) puede retirarse temporalmente y al menos parcialmente de la superficie del lingote por ebullición natural de un film nucleado, de tal modo que el vapor generado en la superficie del metal aleja forzosamente el refrigerante líquido del lingote. Generalmente, sin embargo, el líquido retorna a la superficie tan pronto como tiene lugar un enfriamiento adicional. Si esta retirada temporal de refrigerante tiene lugar antes del contacto deslizante empleado en esta realización ilustrativa, la superficie del lingote puede exhibir una doble inclinación en su perfil de temperatura. El refrigerante enfría la superficie hasta que es retirado temporalmente por ebullición de film nucleado, de tal modo que la temperatura asciende luego en cierto grado, después de lo cual la superficie del lingote pasa a través de un baño de refrigerante mantenido sobre la superficie superior del contacto deslizante (el contacto deslizante puede estar ahondado internamente hacia el lingote a fin de promover la formación de un baño de refrigerante) y la temperatura desciende de nuevo, sólo para aumentar una vez más cuando el contacto deslizante retira la totalidad del refrigerante de la superficie del lingote. Esto produce una forma característica en "W" en la curva de refrigeración de la corteza del lingote (como puede verse por las Figs. 23 y 24).

El contacto deslizante 20 de Fig. 1 puede tener la forma de un anillo de material elastómero 30 blando resistente a la temperatura (v.g. un caucho de silicio resistente a temperatura elevada) mantenido dentro de un alojamiento de soporte rígido circundante 32 (hecho, por ejemplo, de metal).

Si bien Fig. 1 ilustra un contacto deslizante físico 20, pueden emplearse en caso deseado otros medios de retirada del refrigerante. De hecho, a menudo es ventajoso proporcionar métodos de retirada del refrigerante sin contacto. Por ejemplo, pueden proporcionarse chorros de gas o un líquido diferente en el lugar deseado a fin de suprimir el

flujo de refrigerante a lo largo del lingote. Alternativamente, puede hacerse uso de ebullición de un film nucleado como se ha indicado arriba, es decir, puede evitarse que el refrigerante retorne a la superficie del lingote después de la retirada temporal debida a la ebullición del film nucleado. Ejemplos de tales métodos de retirada del refrigerante sin contacto se muestran, por ejemplo, en la Patente U.S. 2.705.353 concedida a Zeigler, la Patente Alemana DE 1.289.957 concedida a Moritz, la Patente US 2.871.529 a Kilpatrick y la Patente US 3.763.921 concedida a Beke et al. (las descripciones de cuyas patentes se incorporan específicamente en esta memoria por referencia). La ebullición de film nucleado puede favorecerse por adición de un gas disuelto o comprimido, tal como dióxido de carbono o aire, al refrigerante líquido, v.g., como se describe en la Patente U.S. No. 4.474.225 concedida a Yu, o las Patentes U.S. 4.693.298 y 5.040.595 concedidas a Wagstaff .

Alternativamente, la velocidad de suministro del refrigerante en las corrientes 18 puede controlarse hasta el punto que la totalidad de refrigerante se evapore de la superficie del lingote antes que el lingote alcance el punto crítico (distancia X) por debajo del molde o antes que la superficie del lingote se enfríe por debajo de una temperatura crítica de la superficie. Esto puede hacerse utilizando un suministro de refrigerante como se muestra en la Patente U.S. 5.582.230 concedida a Wagstaff et al. expedida el 10 de diciembre de 1996. En esta configuración, el líquido refrigerante se suministra a través de dos filas de toberas conectadas a suministros de refrigerante diferentes y es una cuestión sencilla variar la cantidad de refrigerante aplicada a la superficie del lingote para asegurar que el refrigerante se evapora en el lugar deseado (distancia X). Alternativa o adicionalmente, pueden hacerse cálculos de calor de una manera similar a los de la Patente U.S. 6.546.995 basados en porciones anulares de partes anularmente sucesivas del molde para asegurar que se aplica un volumen de agua que se evaporará a medida que es necesario.

Aleaciones de aluminio que pueden colarse conforme a las realizaciones ilustrativas incluyen tanto aleaciones no tratables térmicamente (v.g. las series AA 1000, 3000, 4000 y 5000) como aleaciones tratables térmicamente (v.g. las series AA 2000, 6000 y 7000). En el caso de las aleaciones tratables térmicamente coladas de la manera conocida, Uchida et al., exponían en PCT/JP02/02900 que un paso de homogeneización seguido por un apagado a una temperatura inferior a 300°C, preferiblemente a la temperatura ambiente, antes del calentamiento y la laminación en caliente, y tratamiento térmico y envejecimiento en solución subsiguientes, exhibe propiedades superiores (resistencia a las abolladuras, valores conformados mejorados y propiedades de dureza de las piezas semiacabadas) cuando se compara con materiales procesados convencionalmente. De modo inesperado, esta característica puede duplicarse en las realizaciones ilustrativas durante el procedimiento de colada en lingote, si se desea, sometiendo el lingote (es decir, la parte del lingote que ha sufrido precisamente homogeneización *in situ*) a un paso de apagado después que ha transcurrido un periodo de tiempo suficiente (v.g., al menos 10 a 15 minutos) posterior a la retirada del líquido refrigerante para permitir la homogeneización de la aleación, pero antes de un enfriamiento sustancial adicional del lingote.

Este apagado final (apagado *in situ*) se ilustra en la Fig. 3 de los dibujos que se acompañan donde se realiza una operación de colada DC (esencialmente la misma que la de Fig. 1), pero el lingote está sumergido en un baño 34 de agua (al que se hace referencia como baño de foso o agua de foso) a una distancia adecuada Y por debajo del punto en el que el refrigerante se retira del lingote. Como se ha indicado, la distancia Y tiene que ser suficiente para permitir que la homogeneización *in situ* deseada transcurra durante un periodo de tiempo eficaz, pero insuficiente para permitir un enfriamiento adicional sustancial. Por ejemplo, la temperatura de la superficie exterior del lingote inmediatamente antes de la inmersión en el baño 34 debería ser con preferencia superior a 425°C, y estar comprendida deseablemente en el intervalo de 450 a 500°C. La inmersión causa luego un apagado en agua de la temperatura del lingote hasta una temperatura (v.g., 350°C) por debajo de la cual no tienen lugar las transformaciones de la estructura del sólido en un nivel apreciable. Después de esto, el lingote puede cortarse para formar una longitud estándar utilizada para la laminación o el procesamiento ulterior.

Incidentalmente, para hacer posible que un lingote se apague con agua en toda su longitud, el foso de colada (el foso al que cae el lingote cuando emerge del molde) debería ser más profundo que la longitud del lingote, de tal modo que cuando no se añade más metal fundido al molde, el lingote pueda continuar descendiendo en el foso, y penetrar en baño 34 hasta que el mismo está totalmente sumergido. Alternativamente, el lingote puede sumergirse parcialmente hasta una profundidad máxima del baño 34, después de lo cual puede introducirse más agua en el foso de colada para elevar el nivel de la superficie del baño hasta que el lingote está totalmente sumergido.

Debe indicarse que las realizaciones ilustrativas no se limitan a la colada de lingotes cilíndricos y que las mismas pueden aplicarse a lingotes de otras formas, v.g. lingotes rectangulares o los formados por un molde de colada DC conformado como en Fig. 9 o Fig. 10 de la Patente U.S. No. 6.546.995, expedida el 15 de abril de 2003 a Wagstaff (cuya exposición se incorpora en esta memoria por referencia). La Fig. 10 de la patente se repite en la presente solicitud como Fig. 4, que es una vista en planta desde arriba que mira hacia el borde de colada. Se verá que el molde tiene una forma aproximada de "J" y debe entenderse que produce un lingote que tiene una forma de sección transversal correspondiente. Un lingote embrionario producido a partir de un molde de este tipo tendría un núcleo fundido que está separado de la superficie exterior a diferentes distancias en puntos situados alrededor de la circunferencia del lingote, y así, dada una terminación por enfriamiento igual alrededor de la circunferencia del lingote (distancia X), podrían suministrarse diferentes cantidades de sobrecalentamiento y calor latente de solidificación a diferentes partes de la corteza del lingote.

De hecho, es deseable someter todas las partes de la corteza alrededor de la periferia a la misma temperatura de convergencia. En la Patente U.S. 6.546.995, se aseguran características de colada iguales alrededor del molde por ajuste de la geometría de las superficies de colada del molde a fin de adaptarlas a la forma del lingote de colada. En las realizaciones ilustrativas, es posible asegurar que cada parte de la corteza del lingote embrionario (después de la terminación del enfriamiento) se somete al mismo aporte de calor procedente del núcleo fundido y la misma temperatura de convergencia dividiendo la circunferencia del lingote en segmentos teóricos conforme a la forma del lingote, y retirando fluido refrigerante a distancias diferentes de la salida del molde en los diferentes segmentos. Algunos segmentos (aquellos que se verán sometidos a mayores aportes de calor por el núcleo) estarán expuestos al fluido refrigerante durante un periodo de tiempo más largo que otros segmentos (aquellos que sufren menos exposición al calor). Algunos segmentos de la corteza tendrán por tanto una temperatura inferior que otros después de la retirada del fluido refrigerante, y esta temperatura inferior compensará el mayor aporte de calor para dichos segmentos del núcleo de tal modo que las temperaturas de convergencia se igualen alrededor de la circunferencia del lingote.

Un procedimiento de este tipo puede lograrse, por ejemplo, diseñando un contacto deslizante (a) conformado para ajustarse sin holgura alrededor del lingote conformado, y (b) que tiene diferentes planos o un contorno conformado en el extremo del contacto deslizante que mira hacia el molde, teniendo los diferentes planos o secciones del contorno separación diferente de la salida del molde. Fig. 5 es un gráfico que muestra variaciones en la distancia X alrededor de la periferia del molde de Fig. 4 diseñadas para producir temperaturas de convergencia uniformes alrededor del lingote (la gráfica comienza en el punto S en Fig. 4 y avanza en la dirección de las agujas del reloj). Se utiliza luego un contacto deslizante que tiene una forma periférica correspondiente para causar la ecualización deseada de la temperatura de convergencia alrededor de la periferia del lingote.

Fig. 6 ilustra un contacto deslizante 20' que podría ser eficaz para colar un lingote que tiene una forma similar a la de Fig. 4. Se observará que el contacto deslizante 20' tiene una forma compleja con partes que están elevadas con respecto a otras partes, asegurando con ello que el líquido de refrigeración se retira de la superficie exterior del lingote emergente en posiciones diseñadas para igualar la temperatura de convergencia alrededor del lingote en posiciones inferiores al contacto deslizante 20'.

Los puntos en los que el refrigerante se retira de los diversos segmentos, y la anchura de los segmentos propiamente dichos, pueden decidirse por modelización mediante computadora del flujo de calor en el interior del lingote colado, o por simple tanteo y prueba para cada lingote de forma diferente. Una vez más, el objetivo es alcanzar las mismas o muy similares temperaturas de convergencia alrededor de la periferia de la corteza del lingote.

Como se ha expuesto ya detalladamente, las realizaciones ilustrativas, al menos en sus formas preferidas, proporcionan un lingote que tiene una estructura microcristalina que se asemeja o es idéntica a la de la misma colada metálica de manera convencional (sin contacto deslizante alguno con líquido refrigerante) y sometido posteriormente a homogeneización convencional. Por esta razón, los lingotes de las realizaciones ilustrativas pueden laminarse o mecanizarse en caliente sin recurrir a un tratamiento ulterior de homogeneización. Normalmente, los lingotes se laminan primeramente en caliente y esto requiere que los mismos se precalienten a una temperatura adecuada, v.g. normalmente al menos a 500°C, y más preferiblemente al menos a 520°C. Después de la laminación en caliente, las chapas resultantes de calibre intermedio se laminan luego normalmente en frío al calibre final.

Como un cuarto aspecto de las realizaciones ilustrativas, se ha encontrado que al menos algunos metales y aleaciones se benefician de un procedimiento de pre-calentamiento particular opcional en dos etapas después de la formación del lingote y antes de la laminación en caliente. Tales lingotes pueden producirse idealmente por el proceso de "homogeneización *in situ*" arriba descrito, pero pueden producirse alternativamente por procedimientos de colada convencional, en cuyo caso se obtienen todavía mejoras ventajosas. Este procedimiento de precalentamiento en dos etapas es particularmente adecuado para aleaciones AA3003 y AA3104 -destinadas a tener características de "embutición profunda", v.g. aleaciones de aluminio que contienen Mn y Cu (v.g. la aleación de aluminio AA3003 que tiene 1,5% en peso de Mn y 0,6% en peso de Cu). Estas aleaciones están basadas en reforzamiento por precipitación o dispersión. En el procedimiento de precalentamiento en dos etapas, los lingotes de colada DC se descostran normalmente y se ponen luego en un horno de precalentamiento para un proceso de calentamiento en dos etapas que implica: (1) calentamiento lento hasta una temperatura intermedia de nucleación inferior a una temperatura convencional de laminación en caliente para la aleación de que se trata, y (2) continuación del calentamiento del lingote lentamente hasta una temperatura de precalentamiento de laminación en caliente normal, o una temperatura inferior, y mantenimiento de la aleación a dicha temperatura durante varias horas. La temperatura intermedia permite la nucleación del metal y la re-absorción o destrucción de los núcleos inestables y su reemplazamiento por núcleos estables que forman centros para crecimiento más robusto del precipitado. El periodo de mantenimiento a la temperatura más alta deja tiempo para crecimiento del precipitado a partir de los núcleos estables antes de comenzar la laminación.

La etapa (1) del proceso de calentamiento implica el mantenimiento de la temperatura a la temperatura de nucleación (la temperatura mínima a la cual comienza la nucleación) o, más deseablemente, implica la elevación gradual de la temperatura hacia la temperatura superior de la etapa (2). La temperatura durante esta etapa es de

380-450°C, más preferiblemente 400-420°C, y la temperatura puede mantenerse o llevarse lentamente dentro de este intervalo. La tasa de aumento de temperatura es preferiblemente inferior a 25°C/hora, preferiblemente inferior a 20°C/hora, y se prolonga a lo largo de un periodo de 2 a 4 horas. La velocidad de calentamiento hasta la temperatura de nucleación puede ser mayor, v.g., un promedio de aproximadamente 50°C/hora (aunque la velocidad en la primera media hora poco más o menos puede ser más rápida, v.g. 100-120°C/hora, y se ralentiza luego a medida que se aproxima la temperatura de nucleación).

Después de la etapa (1), la temperatura del lingote se eleva ulteriormente hasta una temperatura a la cual tiene lugar el crecimiento del precipitado, usualmente en el intervalo de 480-550°C, o preferiblemente 500-520°C. La temperatura se mantiene luego constante o se eleva después lentamente (v.g. hasta la temperatura de la laminación en caliente) durante un periodo de tiempo que no es inferior a 10 horas y preferiblemente no mayor que 24 horas en total para el proceso total de calentamiento en dos etapas.

Si bien el calentamiento del lingote directamente a la temperatura de precalentamiento de la laminación (v.g. 520°C) aumenta la población de cristal o precipitado secundario, los precipitados resultantes son generalmente de tamaño pequeño. El precalentamiento a la temperatura intermedia conduce a nucleación y posteriormente, el calentamiento continuado hasta o por debajo de la temperatura de precalentamiento de la laminación (v.g. 520°C) conduce al crecimiento en tamaño de los precipitados secundarios, v.g. a medida que se separa de la solución más Mn y Cu y los precipitados continúan creciendo.

Después del calentamiento a la temperatura de laminación en caliente, se lleva a cabo normalmente la laminación en caliente convencional sin demora.

El proceso descrito en esta memoria que implica homogeneización *in situ* puede utilizarse también para colar lingotes de material compuesto como se describe en la Solicitud de Patente U.S. No. de Serie 10/875978 presentada el 23 de junio 2004, y publicada en fecha 20 de enero 2005 como U.S. 2005-0011630, y como se describe también en la Patente U.S. 6.705.384 expedida en fecha 16 de marzo 2004.

La invención que se presenta en las reivindicaciones se describe con mayor detalle en los Ejemplos y Ejemplos Comparativos siguientes, que se proporcionan únicamente para propósitos ilustrativos y no deben considerarse limitantes.

EJEMPLO 1

Se colaron 3 lingotes de colada directa en coquilla en un Molde de Lingotes de Plancha de Laminación Directa en Coquilla de 530 mm y 1500 mm con una longitud final mayor que 3 metros. Los lingotes tenían una composición idéntica de Al 1,5%Mn; 6%Cu conforme a la Patente U.S. No. 6.019.939. Un primer lingote se coló por el procedimiento DC conforme a un procedimiento convencional; un segundo lingote se sometió a colada DC con homogeneización *in situ* conforme al procedimiento que se presenta en Figs. 7 y 8, en el que el refrigerante se retira y el lingote se deja enfriar a la temperatura ambiente después de ser retirado del foso de colada; y el tercero se coló por el procedimiento DC con homogeneización por apagado *in situ* conforme al procedimiento de Fig. 9, donde el refrigerante se retira de la superficie del lingote y el lingote se deja recalentar y se apaga luego en un foso de agua aproximadamente 1 metro por debajo del molde.

Con mayor detalle, Fig. 7 muestra la temperatura de la superficie y la temperatura del centro (núcleo) a lo largo del tiempo de una aleación Al-Mn-Cu cuando la misma se somete a colada DC y se somete luego a enfriamiento con agua y frotamiento con el líquido refrigerante. La gráfica de la temperatura en la superficie exhibe una fuerte disminución en la temperatura inmediatamente después de la colada a medida que el lingote entra en contacto con el refrigerante, pero la temperatura en el centro se mantiene poco alterada. La temperatura de la superficie desciende hasta un mínimo de aproximadamente 255°C inmediatamente antes de la retirada del refrigerante. La temperatura de la superficie asciende luego y converge con la temperatura central a una temperatura de convergencia o rebote de 576°C. Después de la convergencia (cuando el lingote está solidificado totalmente) la temperatura desciende lentamente y es coherente con la refrigeración por aire.

Fig. 8 muestra la misma operación de colada que Fig. 7, pero prolongándose durante un periodo de tiempo más largo y mostrando en particular el periodo de enfriamiento después de la convergencia o rebote de la temperatura. Puede verse por esta figura que la temperatura del lingote solidificado se mantiene por encima de 425°C durante más de 1,5 horas, lo cual es más que suficiente para conseguir la homogeneización *in situ* del lingote deseada.

Fig. 9 es similar a Fig. 7, pero presenta medidas de temperatura de la misma pieza colada realizadas en 3 momentos ligeramente diferentes (longitudes diferentes de lingote como se muestra en la figura). Las líneas de trazo continuo muestran las temperaturas de superficie de las 3 gráficas, y las líneas de puntos muestran las temperaturas en el centro del espesor del lingote. Los tiempos durante los cuales las temperaturas de superficie se mantienen por encima de 400°C y 500°C pueden determinarse a partir de cada gráfica y son mayores que 15 minutos en cada caso. Se muestran para cada caso las temperaturas de rebote de 563, 581 y 604°C.

Muestras de estos lingotes se laminaron luego con un pre-calentamiento convencional hasta una temperatura de laminación en caliente, o con diversos precalentamientos para demostrar la naturaleza de las realizaciones ilustrativas.

5 Los procedimientos de colada se llevaron a cabo en condiciones de enfriamiento típicas de la industria, v.g., 60 mm/min, 1,5 litros/min/cm, 705°C de temperatura del metal.

Cada lingote se seccionó a lo largo del centro (sección media) produciendo dos porciones de cada lingote de 250 mm de anchura, y luego, mientras se mantenía la historia térmica en el centro y en la superficie, cada plancha de 250 mm se seccionó en lingotes de laminación múltiples, de 75 mm de espesor y 250 mm de anchura (½ espesor del lingote original) y 150 mm de longitud (en la dirección de la colada).

10 Los lingotes de laminación se trataron luego de las maneras siguientes.

La Muestra A (Colada Directa en Coquilla con historia térmica convencional y homogeneización modificada convencional) se puso en un horno a 615°C, donde aproximadamente después de 2 horas y media (2,5) se estabilizó la temperatura del metal y se mantuvo durante 8 horas más a 615°C. La muestra se sometió a apagado en el horno durante 3 horas hasta 480°C y se sometió luego a termodifusión a 480°C durante 15 horas, después de lo cual se retiró y se laminó en caliente hasta 6 mm de espesor. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío hasta 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

15

Las micrografías electrónicas de transmisión que muestran la distribución de precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm (Fig. 10a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 10b).

20

Esta muestra representa colada y homogeneización convencionales, excepto que el paso de homogeneización se abrevió a un total de 26 horas, mientras que la homogeneización convencional normal se lleva a cabo durante 48 horas.

25

La Muestra B (colada directa en coquilla con una historia térmica de colada convencional y con precalentamiento en dos etapas modificado) se puso en un horno a 440°C, donde aproximadamente después de dos (2) horas se estabilizó la temperatura del metal y se mantuvo durante 2 horas más a 440°C. Las temperaturas del horno se elevaron para dejar que el metal se calentara hasta 520°C durante dos (2) horas y la muestra se mantuvo durante 20 horas, después de lo cual se retiró y se laminó en caliente hasta 6 mm de espesor. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío hasta 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

30

Las micrografías electrónicas de transmisión que mostraban la distribución del precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm de espesor (Fig. 11a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 11b).

35

La Muestra C (Colada Directa en Coquilla con historia térmica de colada con homogeneización *in situ* (conforme a las Figs. 7 y 8) y con precalentamiento modificado en dos etapas) se puso en un horno a 440°C, donde aproximadamente después de dos (2) horas se estabilizó la temperatura del metal y se mantuvo durante 2 horas adicionales a 440°C. Las temperaturas del horno se elevaron para dejar que el metal se calentara hasta 520°C durante dos (2) horas y la muestra se mantuvo durante 20 horas, después de lo cual se retiró y se laminó en caliente hasta 6 mm de espesor. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío hasta 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

40

45

Las micrografías electrónicas de transmisión que mostraban la distribución del precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm de espesor (Fig. 12a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de una pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 12b).

50

La Muestra D (colada directa en coquilla con homogeneización *in situ* y apagado (Figura 9) con un precalentamiento de dos etapas) se puso en un horno a 440°C, donde después de dos (2) horas la temperatura del metal se estabilizó y se mantuvo durante 2 horas más a 440°C. Las temperaturas del horno se elevaron para permitir que el metal se calentara a 520°C durante dos (2) horas y se mantuvieron durante 20 horas después de lo cual se retiró el metal y se laminó en caliente hasta un espesor 6 mm. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío hasta 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

55

Las micrografías electrónicas de transmisión que exhibían la distribución del precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 25 mm de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm de espesor (Fig. 13a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 25 mm de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 13b).

La Muestra F (colada directa en coquilla con historia térmica convencional y homogeneización convencional modificada) se puso en un horno a 615°C, donde aproximadamente después de dos horas y media (2,5 h) se estabilizó la temperatura del metal y se mantuvo durante 8 horas más a 615°C. La muestra recibió un apagado en el horno durante 3 horas a 480°C y se sometió luego a termodifusión a 480°C durante 38 horas, después de lo cual se retiró y se laminó en caliente hasta 6 mm de espesor. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío a 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

Las micrografías electrónicas de transmisión que muestran la distribución del precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 1 pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm (Fig. 14a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 25 mm de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 14b). Esta muestra representa la colada y homogeneización convencionales, mientras que la homogeneización convencional normal se lleva a cabo durante 48 horas.

La Muestra G (colada directa en coquilla con un precalentamiento en una sola etapa modificado) se puso en un horno a 520°C, donde aproximadamente después de dos (2) horas se estabilizó la temperatura del metal y se mantuvo durante 20 horas a 520°C, después de lo cual se retiró y se laminó en caliente hasta 6 mm de espesor. Una porción de este calibre de 6 mm se laminó luego en frío hasta 1 mm de espesor, se calentó a una temperatura de recocido de 400°C a una tasa de 50°C/hora, y se mantuvo durante 2 horas, después de lo cual se enfrió en el horno.

Las micrografías electrónicas de transmisión que exhibían la distribución del precipitado secundario se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 1 pulgada (2,54 cm) de cada borde (superficie y centro) del material de 6 mm (Fig. 15a). Las estructuras de los granos recristalizados se caracterizaron en secciones longitudinales tomadas dentro de 25 mm de cada borde (superficies y centro) del material de 1 mm de espesor (Fig. 15b).

EJEMPLO COMPARATIVO 1

Con objeto de ilustrar la diferencia de las realizaciones ilustrativas de los procedimientos de colada conocidos, se colaron lingotes de una aleación Al-4,5%p Cu según la colada DC convencional, conforme al procedimiento de la Patente U.S. 2.705.353 concedida a Ziegler o la Patente U.S. 4.237.961 concedida a Zinniger, y conforme a las realizaciones ilustrativas. La colada Ziegler/Zinniger empleaba un contacto deslizante posicionado para generar una temperatura de rebote/convergencia de sólo 300°C. El proceso de colada de las realizaciones ilustrativas empleaba un contacto deslizante posicionado para generar una temperatura de rebote de 453°C. Se obtuvieron micrografías electrónicas de barrido de los tres productos resultantes y se muestran en Figs. 16, 17 y 18, respectivamente. Fig. 19 muestra las temperaturas del núcleo y la superficie del procedimiento de colada efectuado conforme a las realizaciones ilustrativas sin apagado (véase Fig. 18).

Las SEMs muestran de qué modo varía la concentración de cobre a través de la célula en el producto de los procedimientos de colada realizados no conforme a las realizaciones ilustrativas (Figs. 16, 17 - obsérvese la curva ascendente de las gráficas entre los picos). En cambio, en el caso del producto de las realizaciones ilustrativas, la SEM muestra una variación mucho menor del contenido de Cu dentro de la célula (Fig. 18). Esto es típico de una microestructura de un metal que ha sufrido homogeneización convencional.

EJEMPLO 2

Se coló un lingote de Al-4,5%Cu conforme a la invención y el lingote se enfrió (apagado) al final de la colada. Fig. 20 es una SEM con Barrido de la Línea de Cobre (Cu) del lingote resultante. Debe apreciarse la ausencia de cualquier segregación de cobre en la célula unitaria. Aunque las células son ligeramente mayores que las de Fig. 16, existe una cantidad reducida de fase intermetálica colada en la intersección de las células unitarias y las partículas están redondeadas.

Fig. 21 muestra la historia térmica de la colada del lingote que ilustra el apagado último al final de la colada. En este caso, la temperatura de convergencia (452°C) es inferior a la del solvus para la composición seleccionada, pero se obtienen propiedades deseables.

EJEMPLO COMPARATIVO 2

Fig. 22 muestra fracciones de área representativas de fases intermetálicas coladas que comparan las tres rutas de procesamiento diferentes que se han indicado arriba (colada DC convencional y enfriamiento (marcada DC), colada

DC y enfriamiento sin apagado final conforme a las realizaciones ilustrativas (marcada muestra ID *in situ*), y colada DC con apagado final conforme a las realizaciones ilustrativas (marcada apagada *in situ*). Un área más pequeña se considera mejor para las propiedades mecánicas de la aleación resultante. Esta comparación muestra una fracción decreciente de área de la fase intermetálica colada conforme a los diferentes métodos en el orden dado. El área de fase máxima se produce por la ruta DC convencional y la mínima por la invención con apagado final.

EJEMPLO 3

Se coló un lingote de una aleación Al-0,5% Mg-0,5% Si (6063) conforme a un proceso como el ilustrado en el gráfico de Fig. 23. Ésta muestra la historia térmica en la región en la que tiene lugar la solidificación y el recalentamiento en un caso en el que la masa del lingote no se somete a enfriamiento forzado.

Se coló la misma aleación en las condiciones que se muestran en Fig. 24 (con inclusión de un apagado). Ésta muestra la evolución de la temperatura de un lingote en el que las temperaturas de la superficie y el núcleo convergían a una temperatura de 570°C, y que se enfría luego forzosamente a la temperatura ambiente. Esto puede compararse con el procedimiento que se muestra en Fig. 8 que implicaba una temperatura de rebote alta y enfriamiento lento, lo cual es deseable cuando se necesita una corrección más rápida de la segregación celular, o cuando la aleación contiene elementos que se difunden a un ritmo lento. El uso de una temperatura de rebote alta (considerablemente superior al solvus de la aleación), mantenida durante un periodo de tiempo prolongado, permite que los elementos próximos al límite de grano se difundan bastante rápidamente en las fases intermetálicas coladas, permitiendo con ello la modificación o una transformación más completa en fases intermetálicas más útiles o beneficiosas, y la formación de una zona exenta de precipitado alrededor de las fases intermetálicas coladas. Se observará que Fig. 24 presenta la forma de "W" de la curva de enfriamiento para la característica de la corteza del film nucleado que hierve antes del contacto deslizante.

EJEMPLO COMPARATIVO 3

Figs. 25a, 25b y 25c son patrones de difracción de rayos X tomados de una aleación 6063 que diferencian la cantidad de fases α y β que contrastan con la colada DC convencional y dos procedimientos *in situ* de Figs. 18 y 19. La traza superior de cada figura representa una aleación DC colada convencionalmente; la traza central representa una temperatura de rebote inferior a la temperatura de transformación de la aleación, y la traza inferior representa una temperatura de rebote superior a la temperatura de transformación de la aleación.

EJEMPLO COMPARATIVO 4

Figs. 26a, 26b y 26c son representaciones gráficas de técnicas FDC en las cuales Fig. 26a representa el lingote de colada por DC convencional, Fig. 26b representa la aleación de Fig. 23, y Fig. 26c representa la aleación de Fig. 24. Las figuras muestran un aumento en la presencia de la fase α deseable a medida que la temperatura de rebote sobrepasa la temperatura de transformación.

Incidentalmente, puede obtenerse más información acerca de ambas técnicas FDC y SiBut/XRD, así como su aplicación al estudio de las transformaciones de fase, de: "Intermetallic Phase Selection and Transformation in Aluminium 3xxx Alloys", por H.Cama, J.Worth, P.V. Evans, A. Bosland y J.M. Brown, Solidification Processing, Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing, University of Sheffield, julio de 1997, editores J.Beech y H.Jones, p. 555.

EJEMPLO 4

Figs. 27a y 27b muestran dos fotomicrografías ópticas de una aleación intermetálica colada, Al-1,3% Mn (AA3003) procesada conforme a la invención. Puede verse que las fases intermetálicas (formas oscuras en la figura) están agrietadas o fracturadas.

Fig. 28 es una fotomicrografía óptica similar a las de Figs. 27a y 27b, mostrando de nuevo que el compuesto intermetálico está agrietado o fracturado. La región grande de la partícula es de $MnAl_6$. Las características estriadas muestran la difusión de Si en la fase intermetálica, formando $AlMnSi$.

EJEMPLO 5

Fig. 29 es una imagen por Microscopía Electrónica de Transmisión TEM de una fase intermetálica como resulta de la colada de una aleación AA3104 colada sin apagado final, como se muestra en Fig. 31. La fase intermetálica está modificada por difusión de Si en la partícula, mostrando una zona desnuda. La muestra se tomó de la superficie en la que la aplicación inicial de refrigerante provoca la nucleación de las partículas. Sin embargo, la temperatura de rebote modifica la partícula y modifica la estructura.

EJEMPLO COMPARATIVO 5

Fig. 30 muestra la historia térmica de la aleación Al-7% Mg procesada convencionalmente. Puede verse que no existe rebote alguno de la temperatura de la corteza debido a la presencia continuada de refrigerante.

Figs. 31 y 23 muestran la historia térmica de una aleación Al-7% Mg en la cual el lingote no se enfría durante la colada. Esta aleación forma la base de Fig. 30.

EJEMPLO COMPARATIVO 6

5 Fig. 33 es una traza de un Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC) que muestra la presencia de fase Beta (β) en el rango de 450°C de la aleación de colada convencional directa en coquilla que forma la base de Fig. 30. La fase β causa problemas durante la laminación. La presencia de la fase beta puede verse por la pequeña inclinación de la traza inmediatamente por encima de 450°C a medida que se absorbe calor para convertir la fase β en fase α . La gran inclinación que desciende hasta 620°C representa la fusión de la aleación.

10 Fig. 34 es una traza similar a la de Fig. 33 que muestra la ausencia de fase Beta (β) en la colada de material conforme a esta invención donde el lingote se mantiene caliente (sin apagado final) durante la colada (véase Fig. 31).

Fig. 35 es una vez más una traza similar a la de Fig. 33 para el material colado conforme a esta invención donde el lingote se mantiene caliente (sin apagado final) durante la colada (véase Fig. 32). De nuevo, la traza muestra una ausencia de fase Beta (β).

REIVINDICACIONES

1. Un método de calentamiento de un lingote metálico colado de aleación de aluminio AA3003 o AA3104, para preparar dicho lingote para mecanizado en caliente a una temperatura predeterminada, método que comprende:

(a) precalentar dicho lingote a una temperatura de nucleación que es inferior a dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente y es una temperatura a la cual ocurre nucleación de precipitado en el metal para hacer que tenga lugar formación de núcleos, estando comprendida dicha temperatura de nucleación en un intervalo de 380°C a 450°C;

(b) mantener dicho lingote a dicha temperatura de nucleación, o elevar gradualmente la temperatura de dicho lingote desde dicha temperatura de nucleación a una tasa menor que 25°C/h hasta una temperatura de nucleación superior dentro de dicho intervalo de 380°C-450°C, durante un periodo de 2 a 4 horas;

(c) después de dicho paso de mantenimiento (b), calentar ulteriormente dicho lingote hasta una temperatura de crecimiento del precipitado comprendida en un intervalo de 480°C a 550°C y mantener el lingote a dicha temperatura durante al menos 10 horas, al cabo de las cuales se produce crecimiento de precipitado para causar el crecimiento de precipitado en el metal, siendo dicha temperatura de crecimiento del precipitado mayor que la o que cada temperatura de nucleación del paso (b); y

(d) si dicho lingote no se encuentra ya a dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente después del paso (c), calentar adicionalmente dicho lingote hasta dicha temperatura predeterminada de mecanizado en caliente lista para el mecanizado en caliente.

2. Un método conforme a la reivindicación 1, en donde dicho aumento de temperatura en el paso (b) tiene lugar a una tasa inferior a 20°C/h.

3. Un método conforme a una cualquiera de reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que dicho lingote metálico colado es un lingote producido por un método que comprende los pasos de:

(i) suministrar metal fundido desde al menos una fuente a una región en la que el metal fundido está confinado periféricamente, proporcionando con ello al metal fundido una porción periférica;

(ii) enfriar la porción periférica del metal, formando con ello un lingote embrionario que tiene una envuelta externa sólida y un núcleo interno fundido;

(iii) hacer avanzar el lingote embrionario en una dirección de avance en el sentido de alejamiento de la región en la que el metal fundido está confinado periféricamente mientras se suministra metal fundido adicional a dicha región, extendiendo con ello el núcleo fundido contenido en el interior de la envuelta sólida más allá de dicha región;

(iv) enfriar una superficie externa del lingote embrionario que emerge de la región en la que el metal está confinado periféricamente dirigiendo un suministro de líquido refrigerante sobre dicha superficie externa; y

(v) retirar una cantidad eficaz del líquido refrigerante de la superficie externa del lingote embrionario en una localización en la superficie externa del lingote en la que una sección transversal del lingote perpendicular a la dirección de avance intercepta una porción de dicho núcleo fundido de tal modo que el calor interno del núcleo fundido recalienta la envuelta sólida adyacente al núcleo fundido después de la retirada de dicha cantidad eficaz de líquido refrigerante, causando con ello que las temperaturas de dichos núcleo y envuelta se aproximen cada una a una temperatura de convergencia de 425°C o mayor.

4. Un método conforme a la reivindicación 3, que incluye un método de colada directa en coquilla que comprende los pasos de:

(a) proporcionar un molde de colada directa en coquilla que tiene una o más entradas de molde y una o más salidas de molde;

(b) suministrar metal fundido a al menos una entrada del molde de colada;

(c) enfriar el molde para solidificar una porción periférica del metal, formando con ello un lingote embrionario que tiene una envuelta externa sólida;

(d) hacer avanzar continuamente el lingote embrionario más allá de al menos una salida del molde, extendiendo con ello el núcleo fundido contenido en el interior de la envuelta sólida más allá de dicha al menos una salida del molde;

(e) enfriar el lingote embrionario que emerge del molde para continuar la solidificación del mismo dirigiendo un suministro de líquido refrigerante sobre una superficie externa del lingote embrionario;

(f) hacer que dicho líquido refrigerante se retire de la superficie del lingote embrionario antes que el lingote se haya transformado en un lingote totalmente sólido a fin de que el calor interno del núcleo fundido recaliente la envuelta sólida adyacente al núcleo, causando con ello que las temperaturas de dicho núcleo y dicha envuelta se equilibren a una temperatura de convergencia, retirándose dicho líquido refrigerante de dicha superficie a una distancia de dicha salida del molde que hace que dicha temperatura de convergencia sea superior a una temperatura de transformación a la cual dicho metal sufre homogeneización in situ;

(g) enfriar dicho lingote o dejar que dicho lingote se enfríe.

5. Un método conforme a la reivindicación 5, caracterizado por que dicha temperatura de transformación es 425°C o mayor.

6. Un método conforme a una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que dicho lingote se calienta a dicha temperatura de nucleación a una tasa media de aproximadamente 50°C por hora.

7. Un método conforme a una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la temperatura de mecanizado en caliente es una temperatura comprendida el intervalo de 480°C a 550°C.

8. Un método conforme a una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la temperatura de crecimiento de precipitado se mantiene durante un periodo de tiempo que prolonga un periodo del paso total de precalentamiento a un intervalo de 10 a 24 horas.

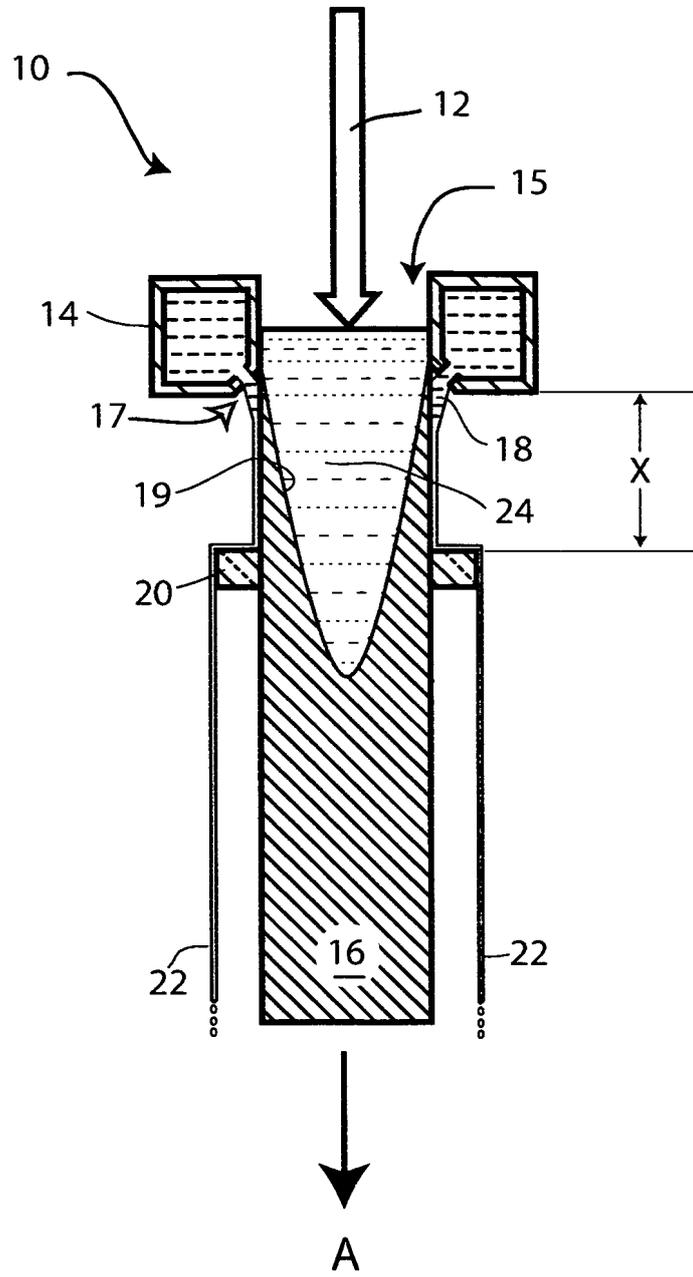


Fig. 1

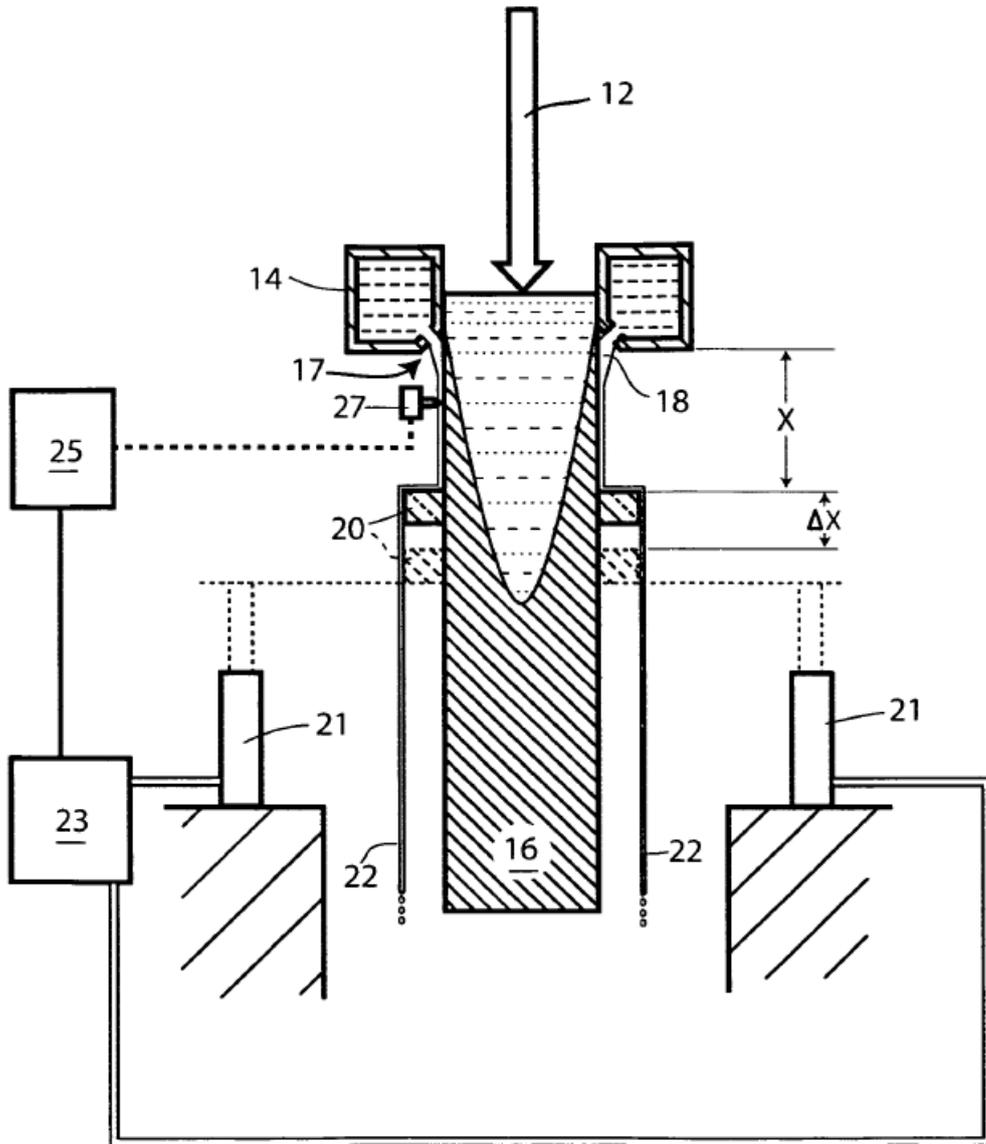


Fig. 2

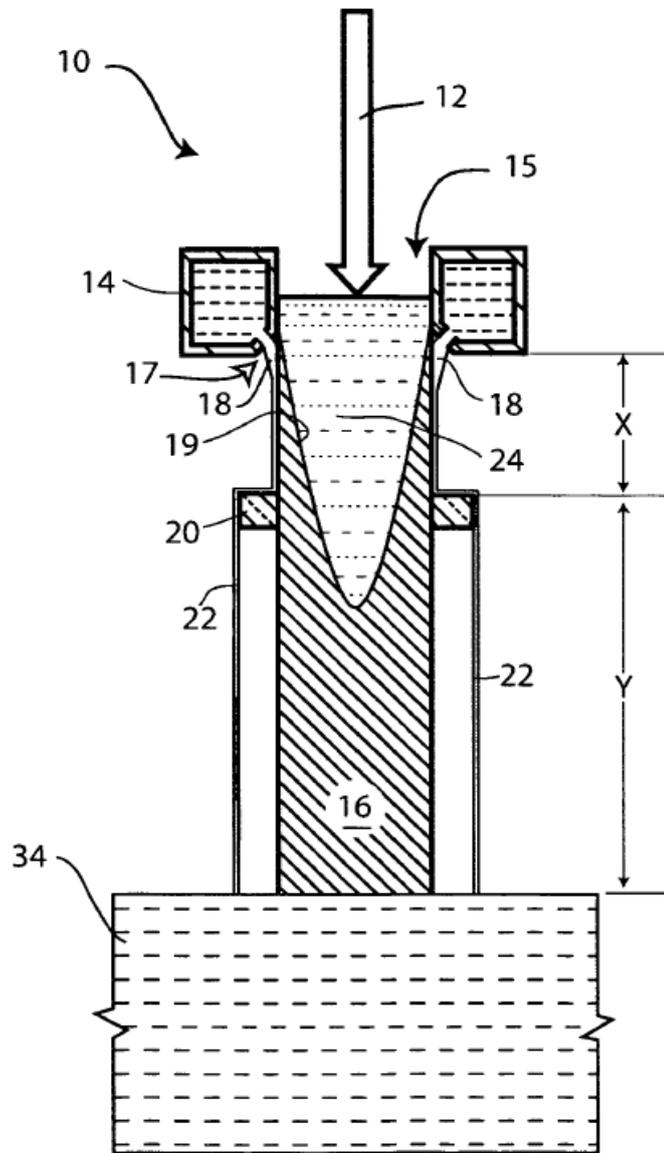
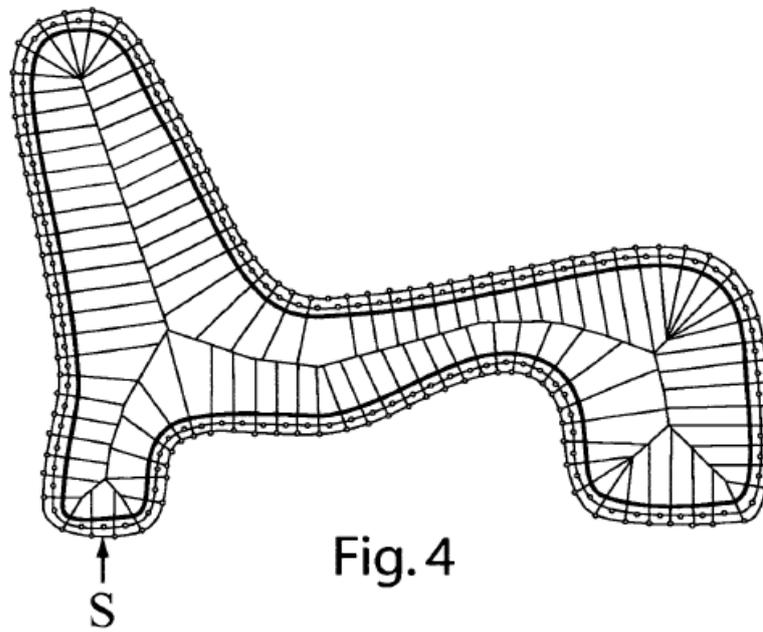


Fig. 3



Altura del contacto deslizante

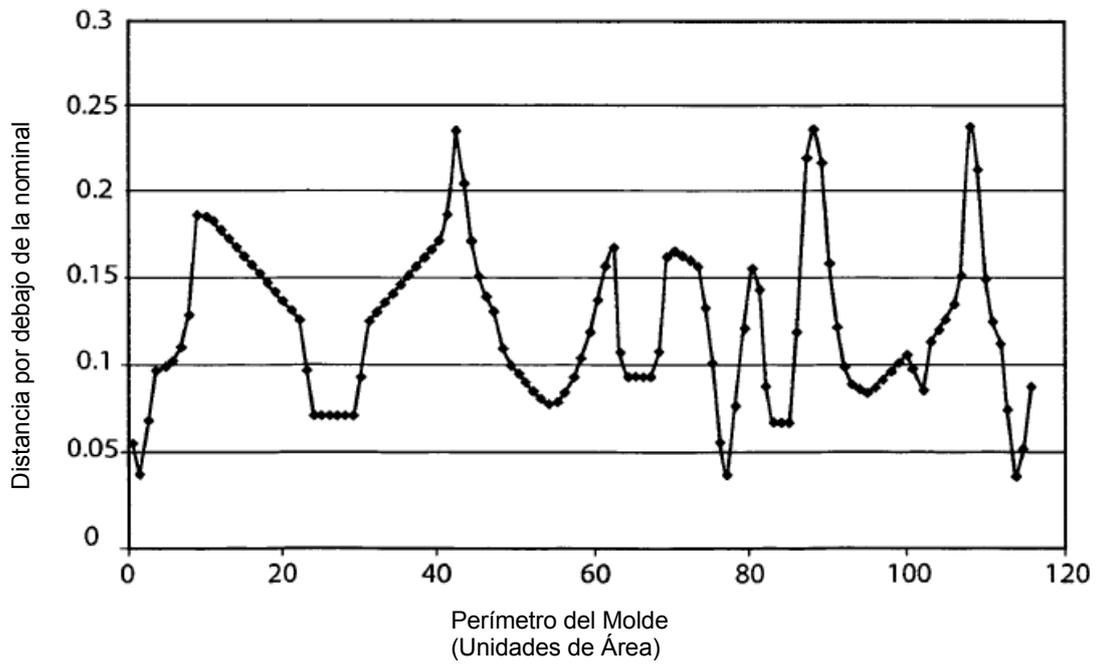


Fig. 5

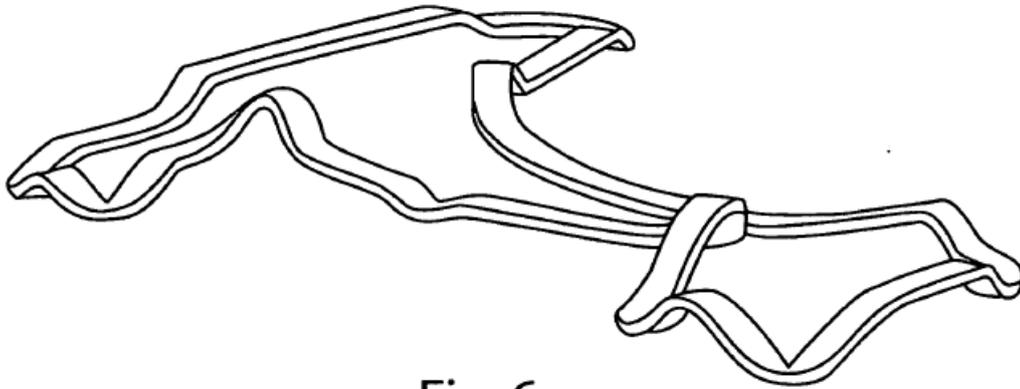


Fig. 6

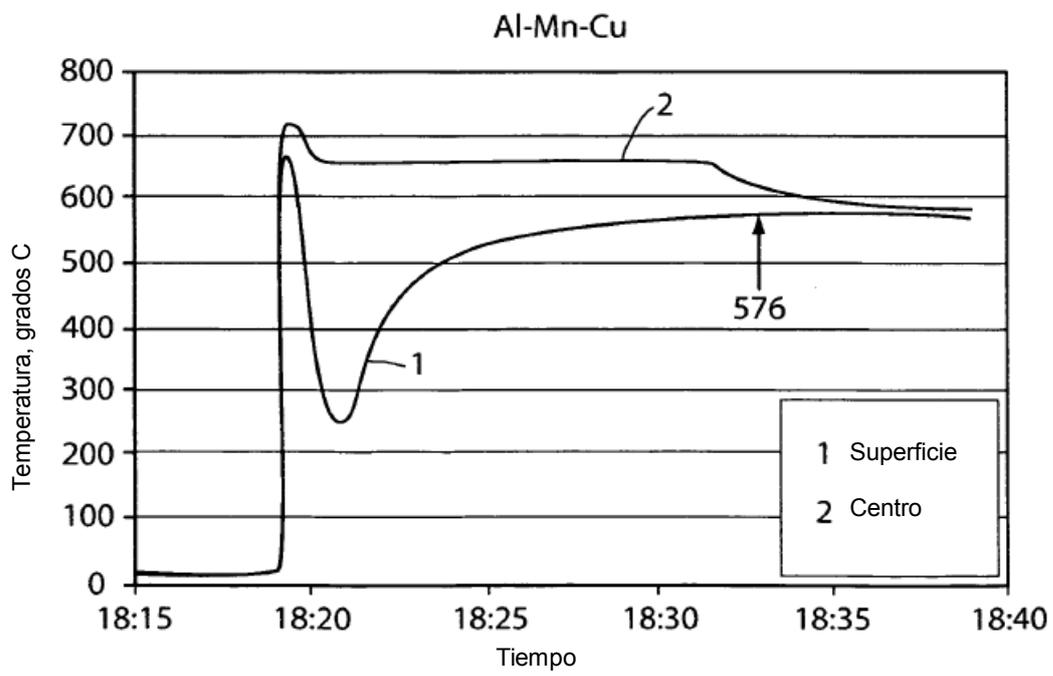


Fig. 7

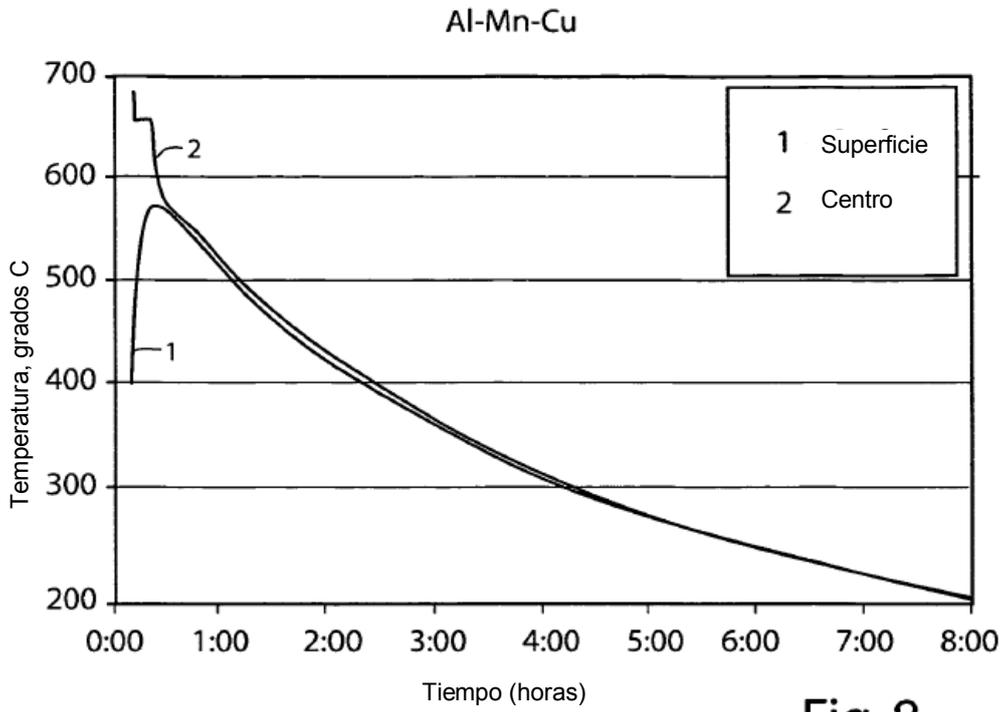


Fig. 8

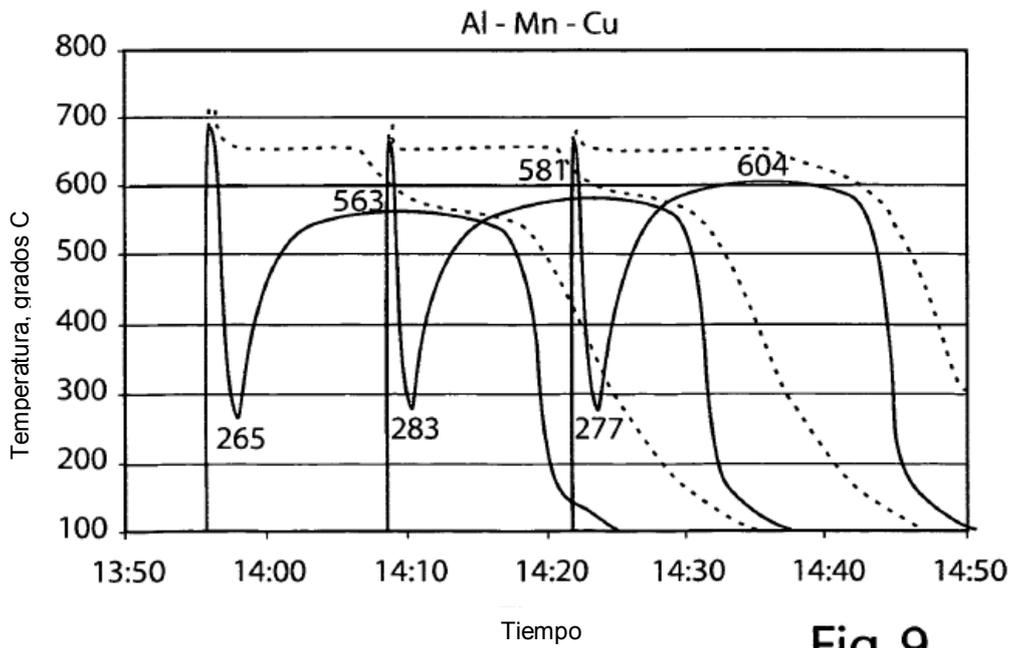


Fig. 9

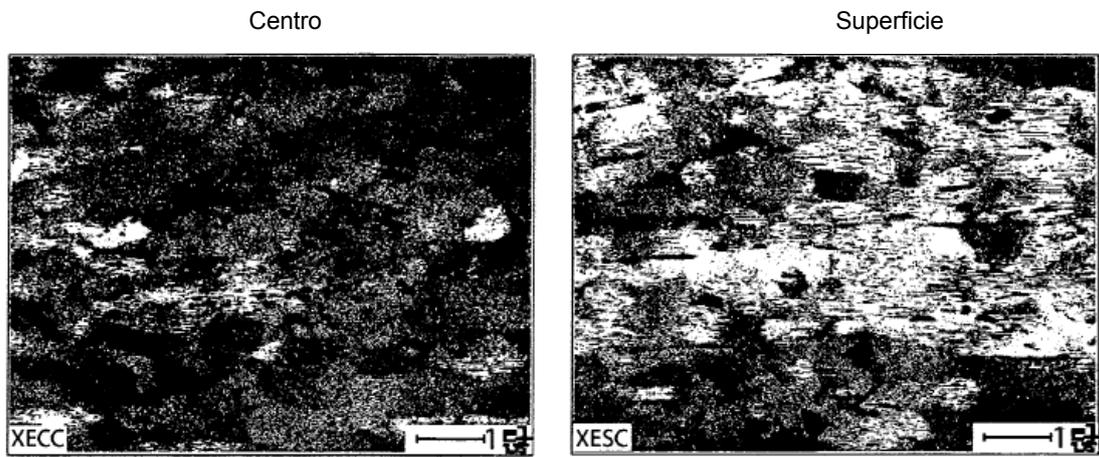


Fig. 10a

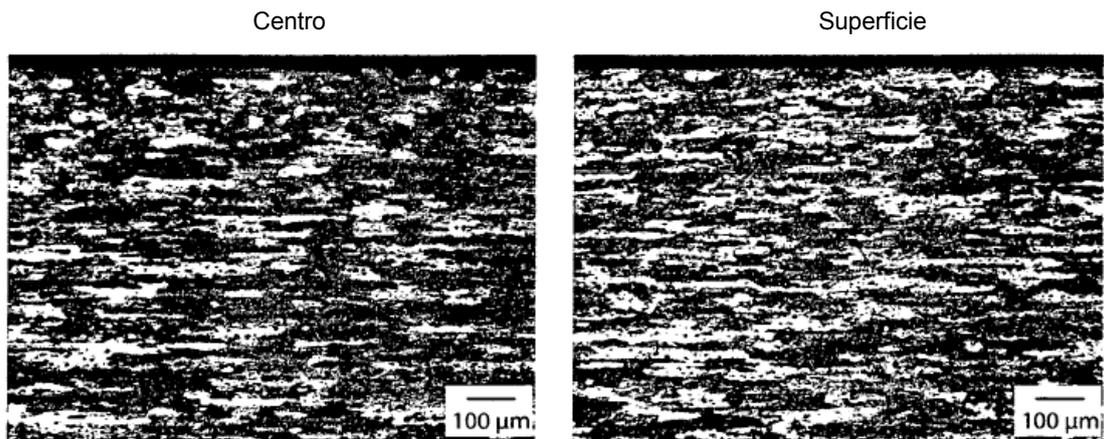


Fig. 10b

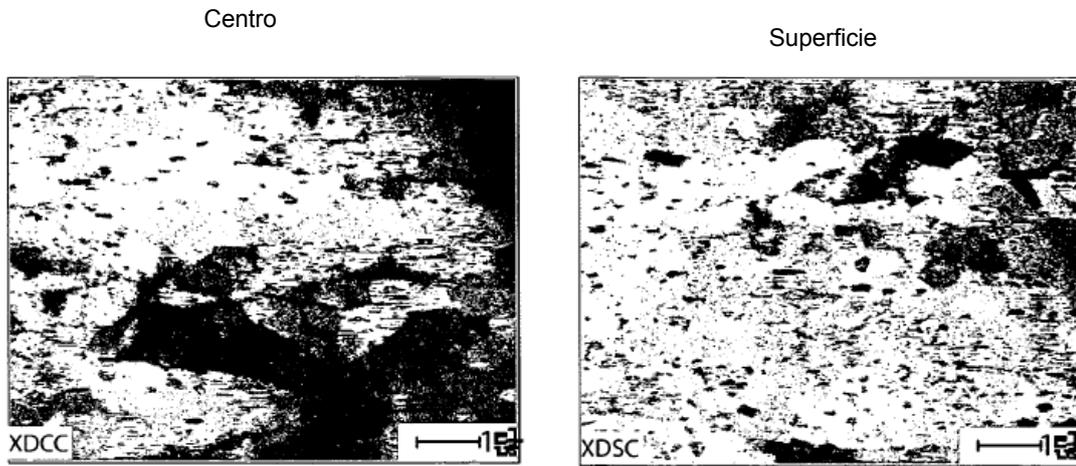


Fig. 11A

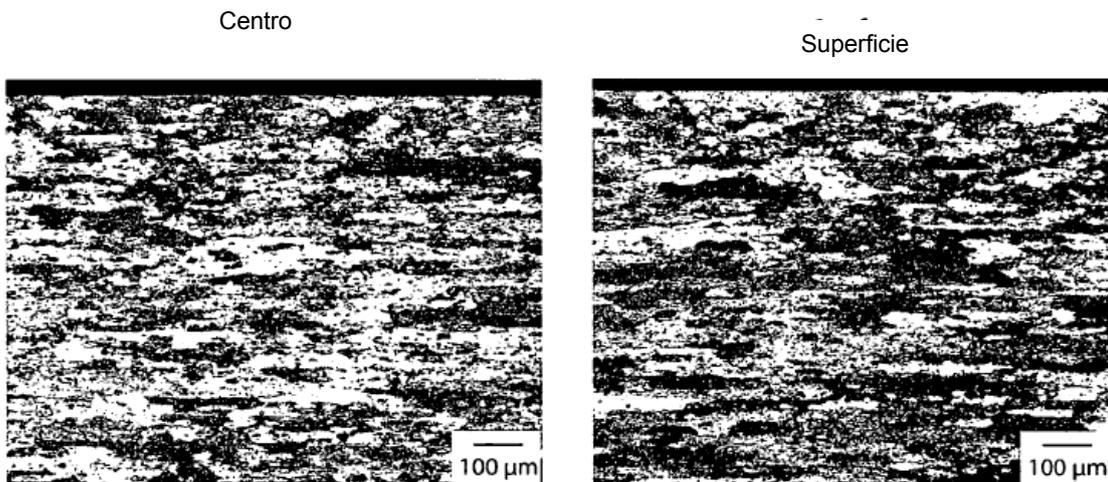


Fig. 11B

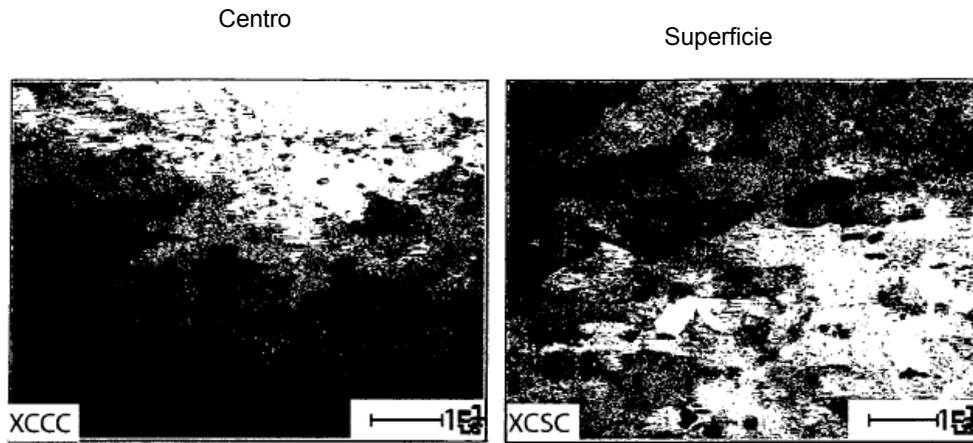


Fig. 12a

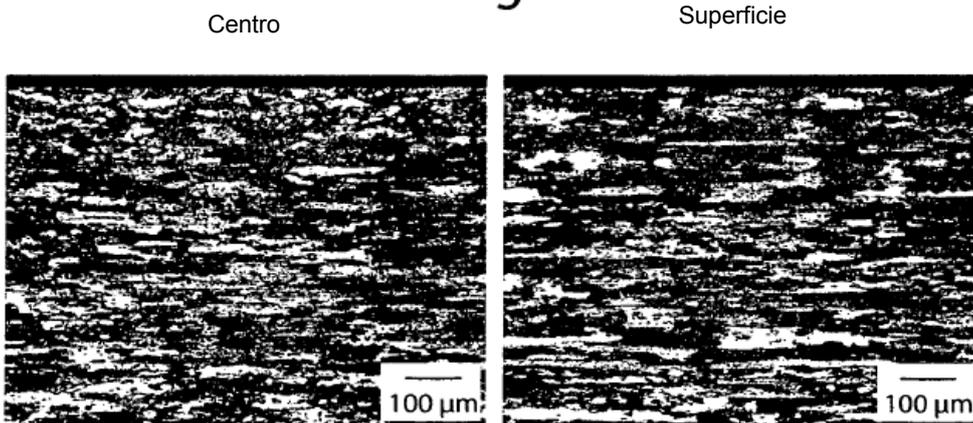


Fig. 12b

Centro

Superficie

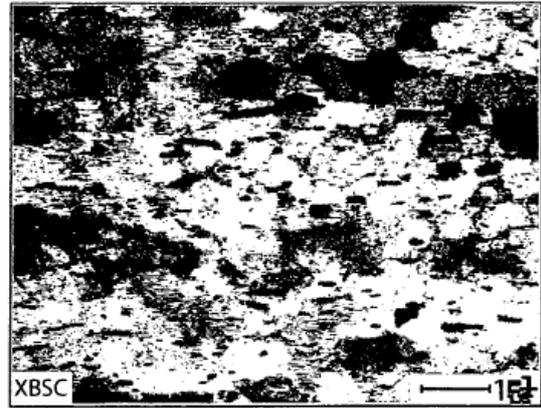
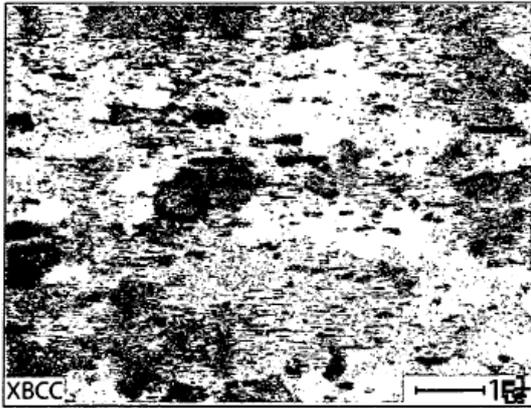


Fig. 13a

Centro

Superficie



Fig. 13b

Centro

Superficie

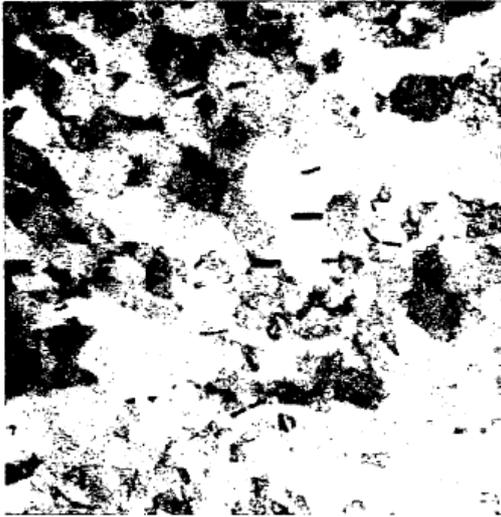


Fig. 14a

Centro

Superficie

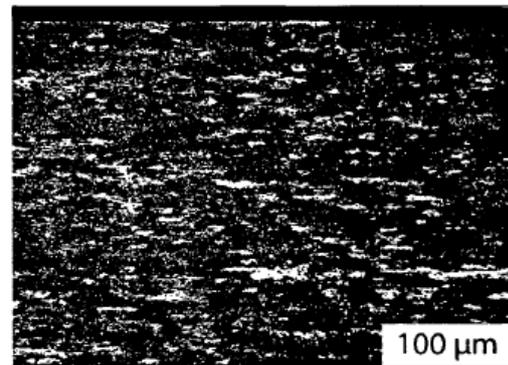
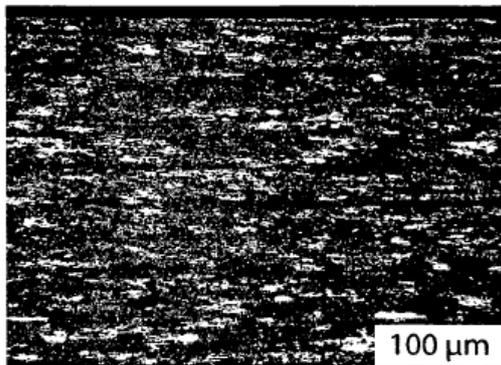


Fig. 14b

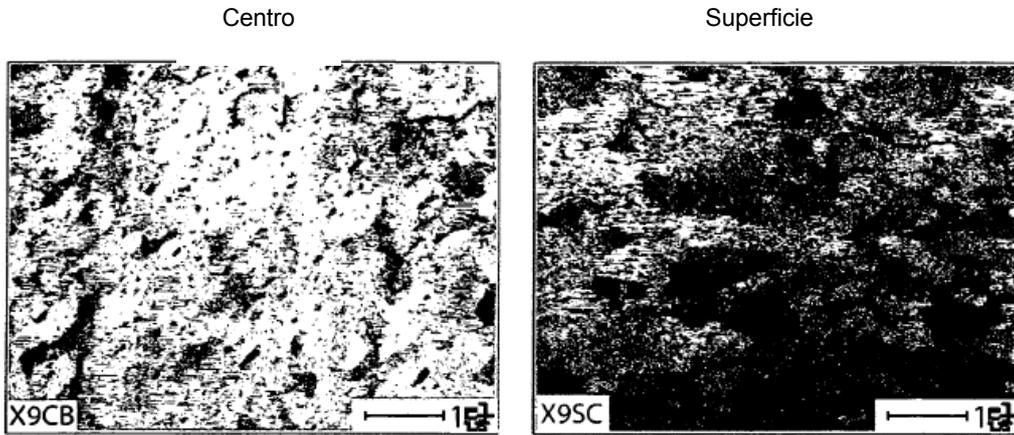


Fig. 15a

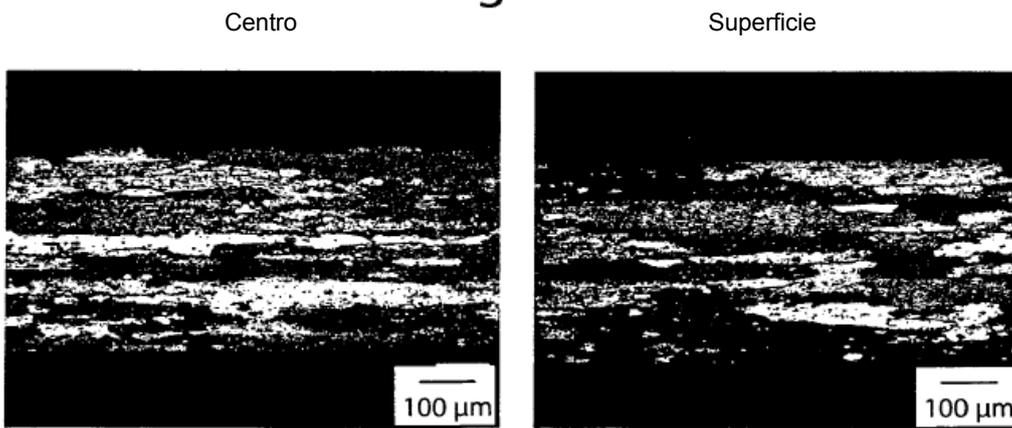
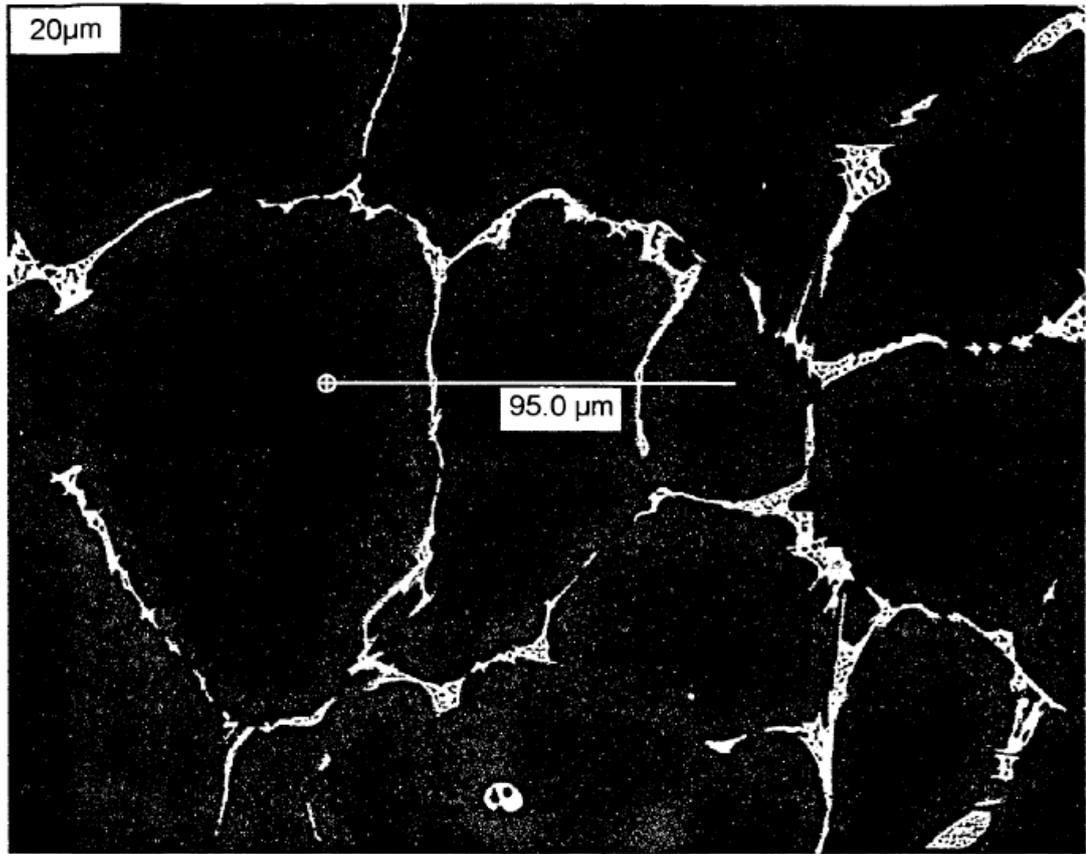
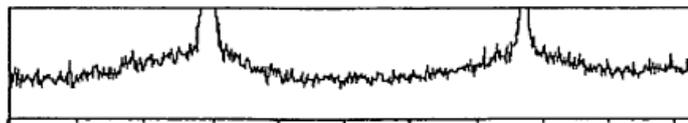


Fig. 15b



CuLa1, , 250



CuKa, 100

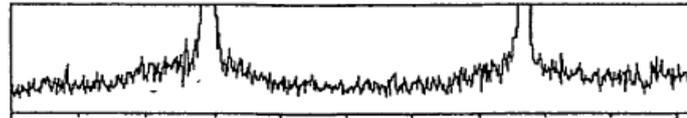
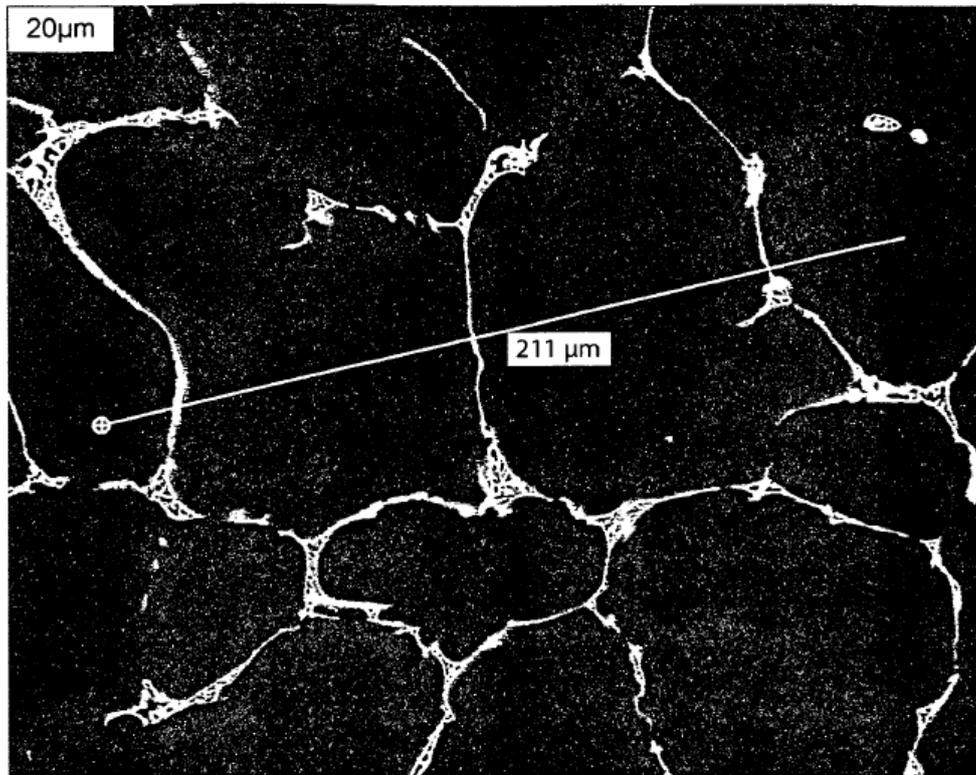


Fig. 16



Al-4,5% Cu in situ con temperatura de rebote de 300°C. Posición cuarta (FE4628)

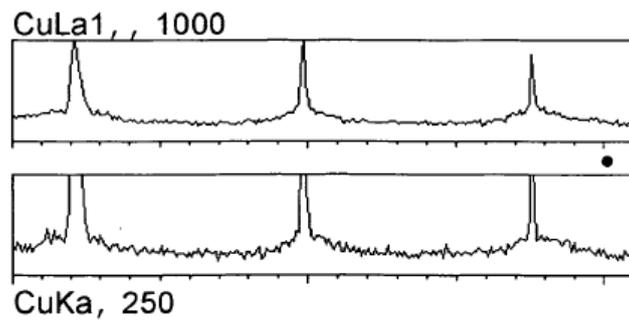
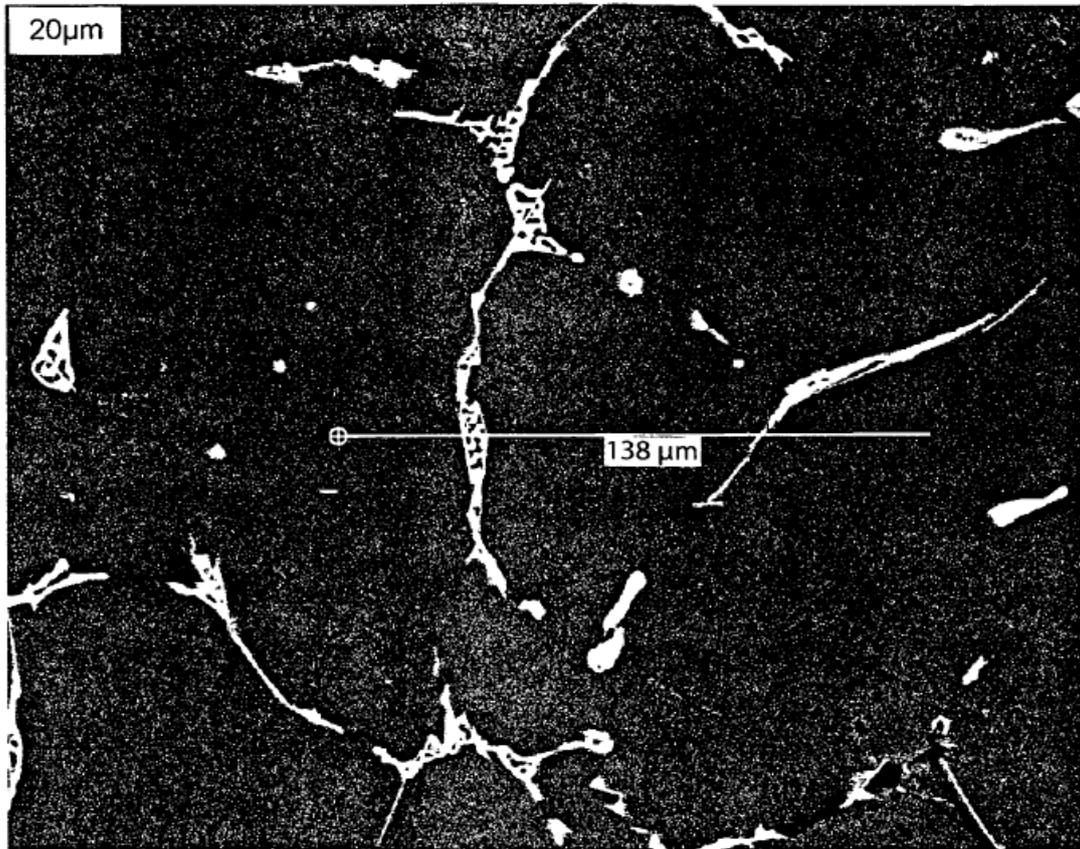
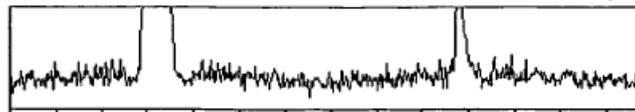
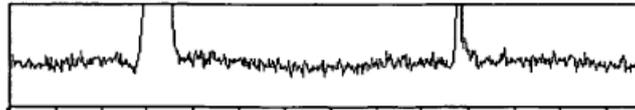


Fig. 17



CuLa1, , 250



CuKa, 100

Fig. 18

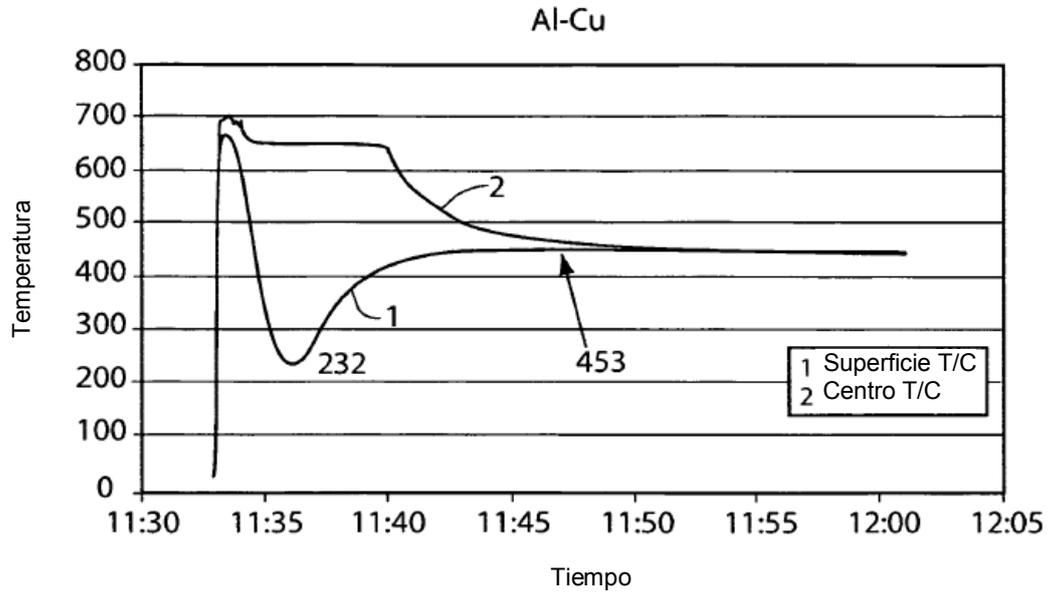


Fig. 19

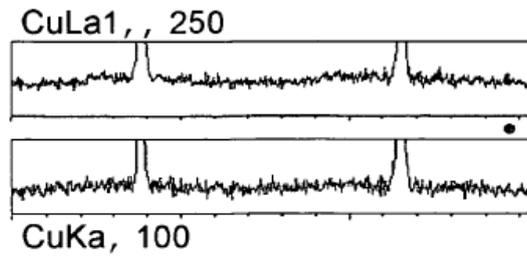
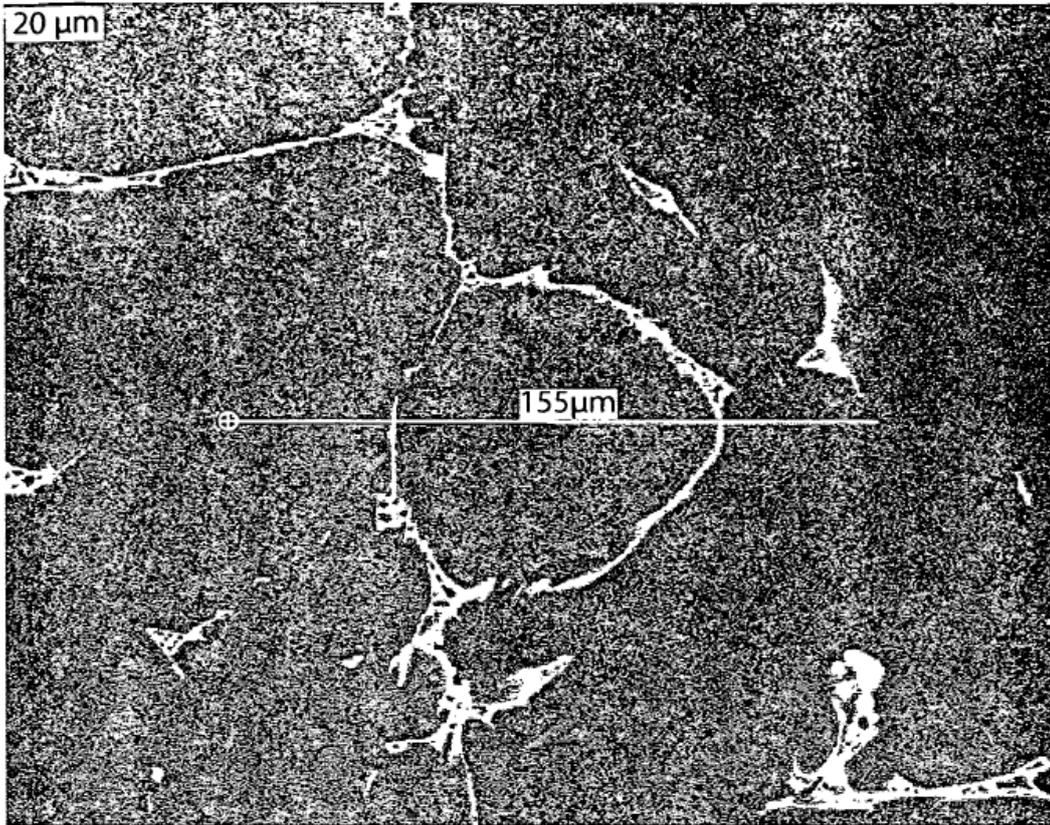


Fig. 20

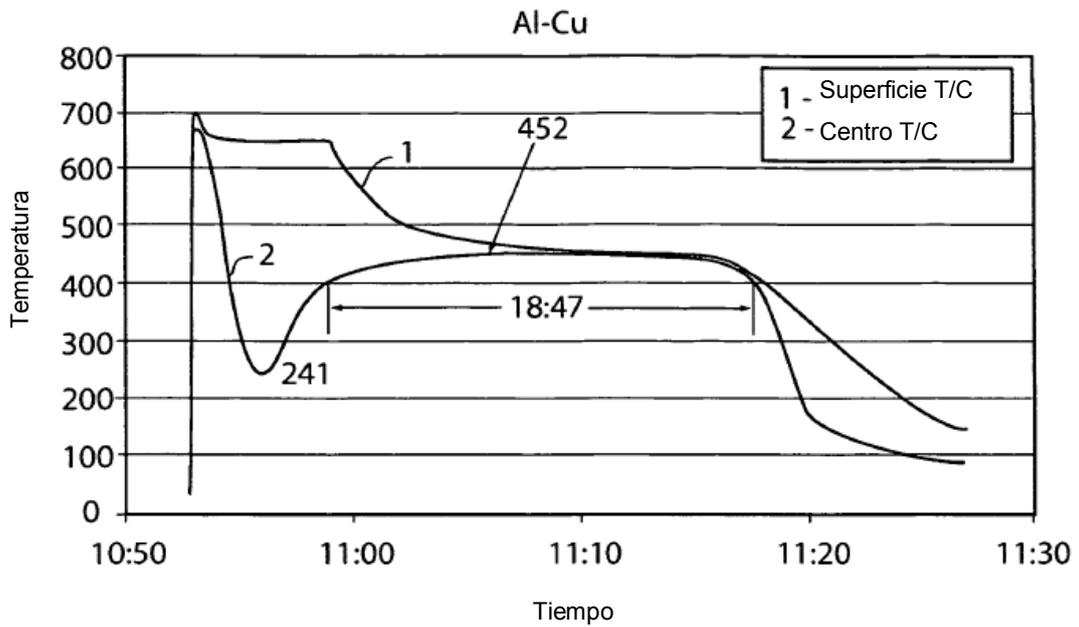


Fig. 21

Fracción de Área Eutéctica Media
(95% CI sobre 30 campos, SEM BSE, 500X)

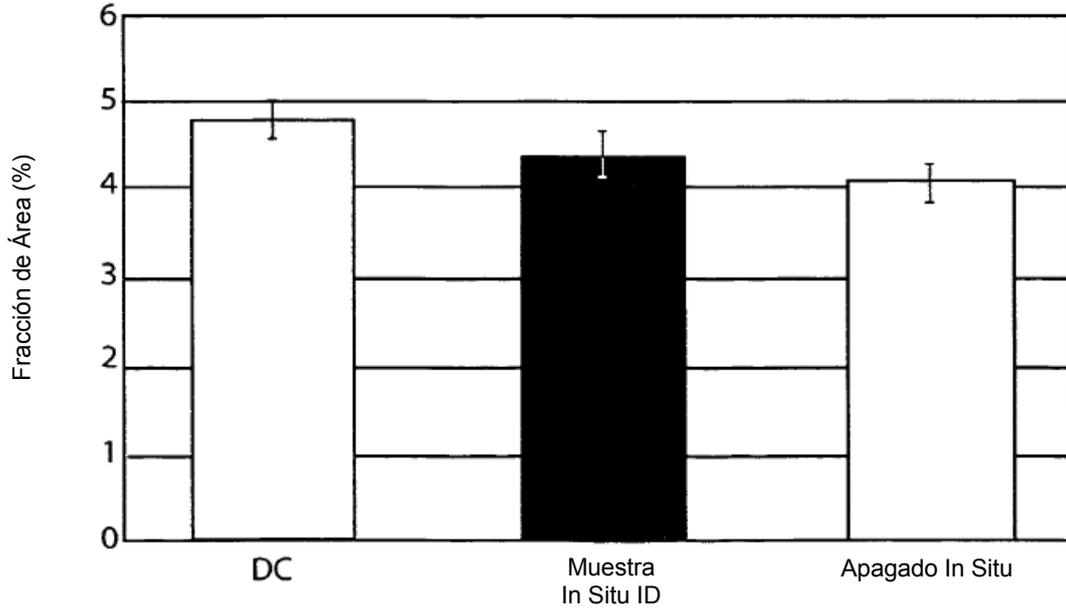


Fig. 22

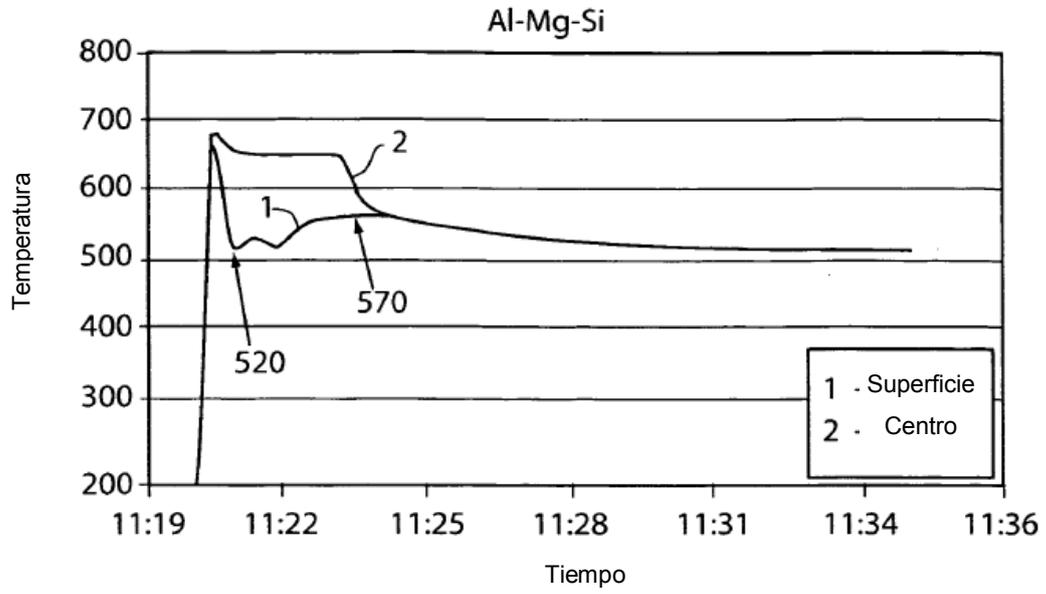


Fig. 23

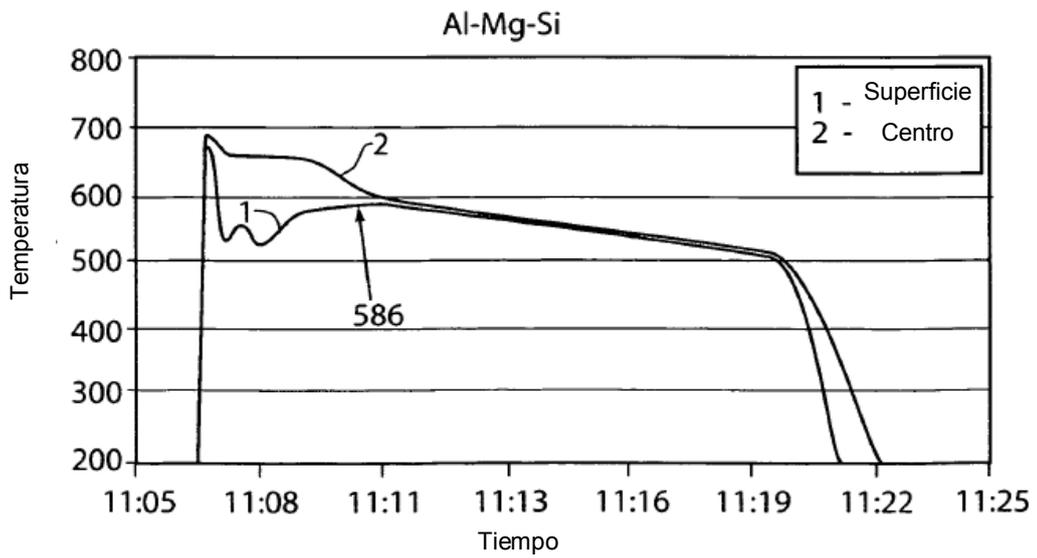


Fig. 24

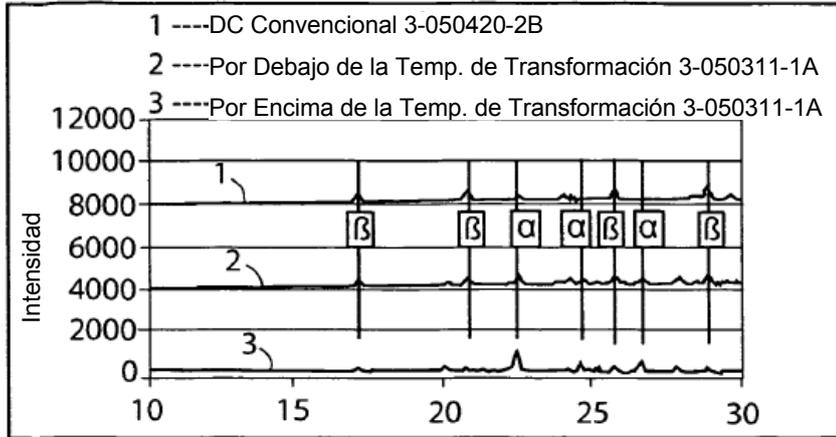


Fig. 25a

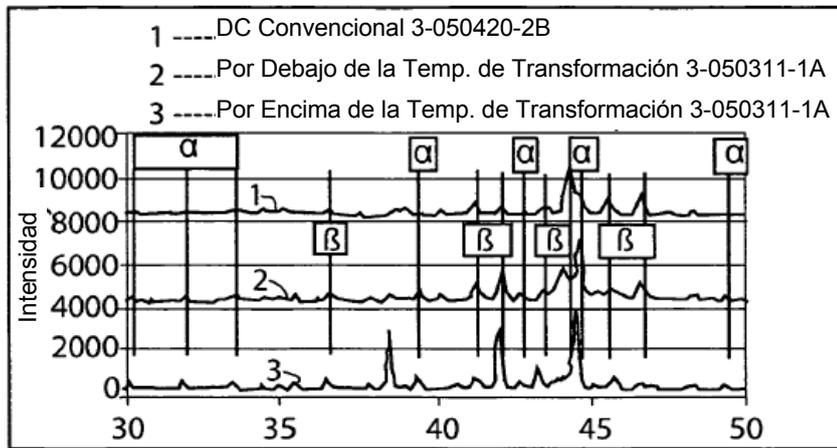


Fig. 25b

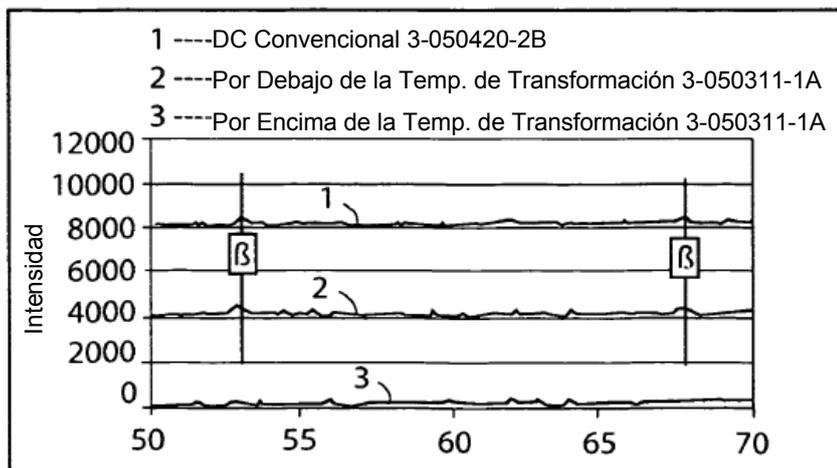


Fig. 25c

División: Alfa/Beta

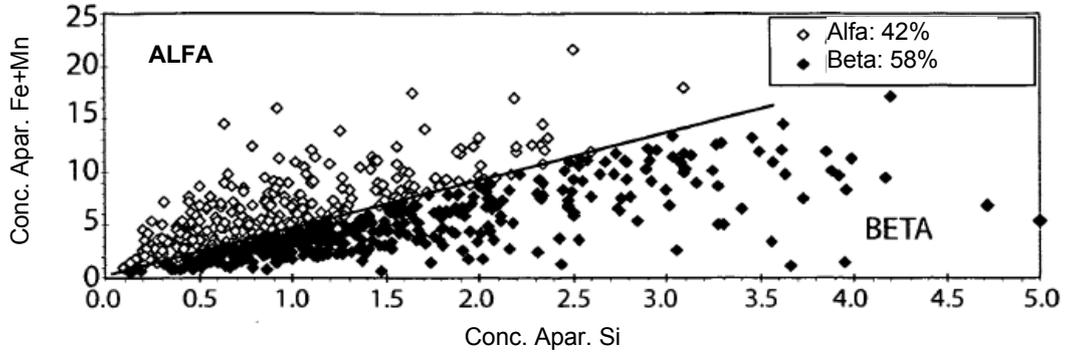


Fig. 26a

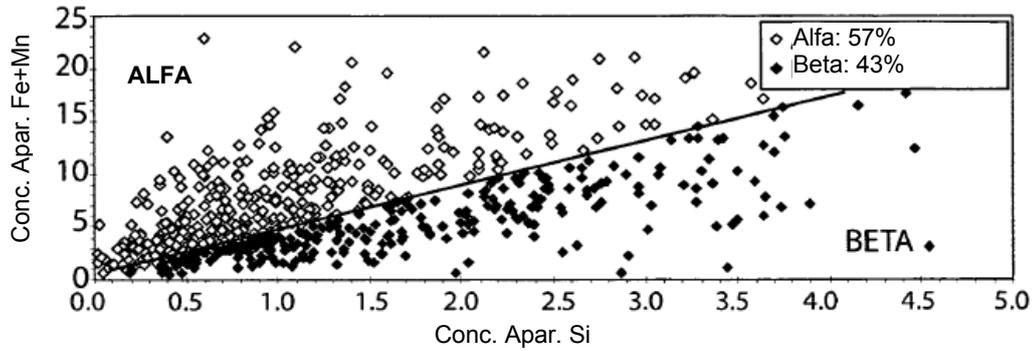


Fig. 26b

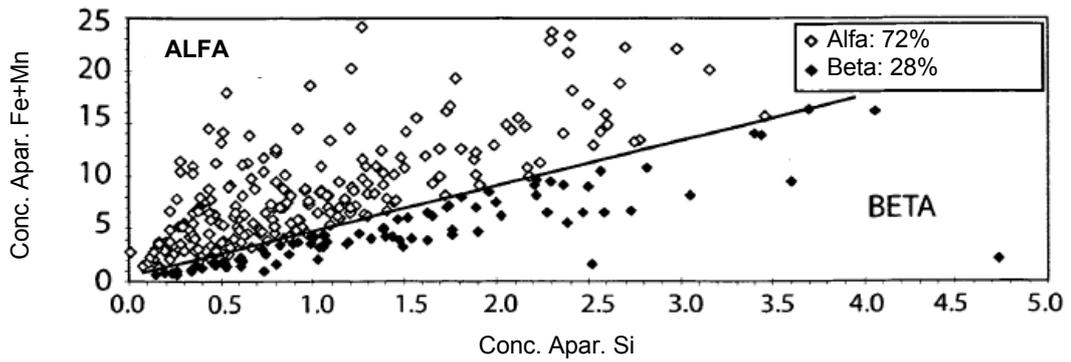


Fig. 26c



Fig 27a



Fig 27b

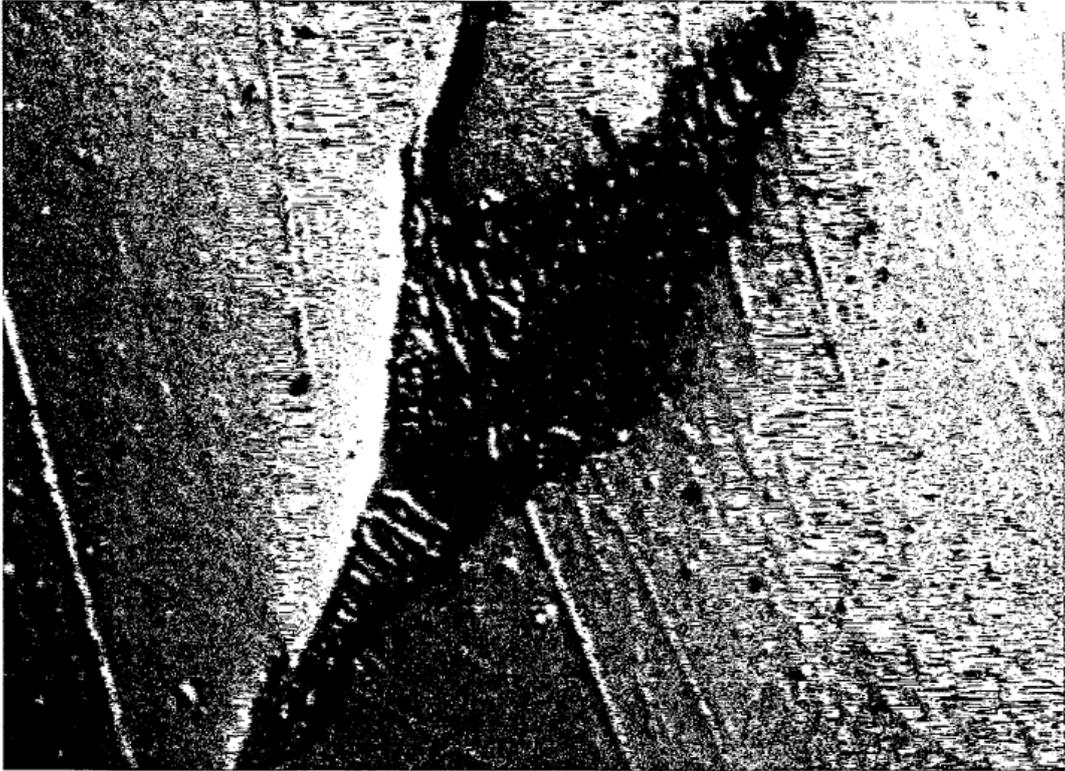


Fig. 28

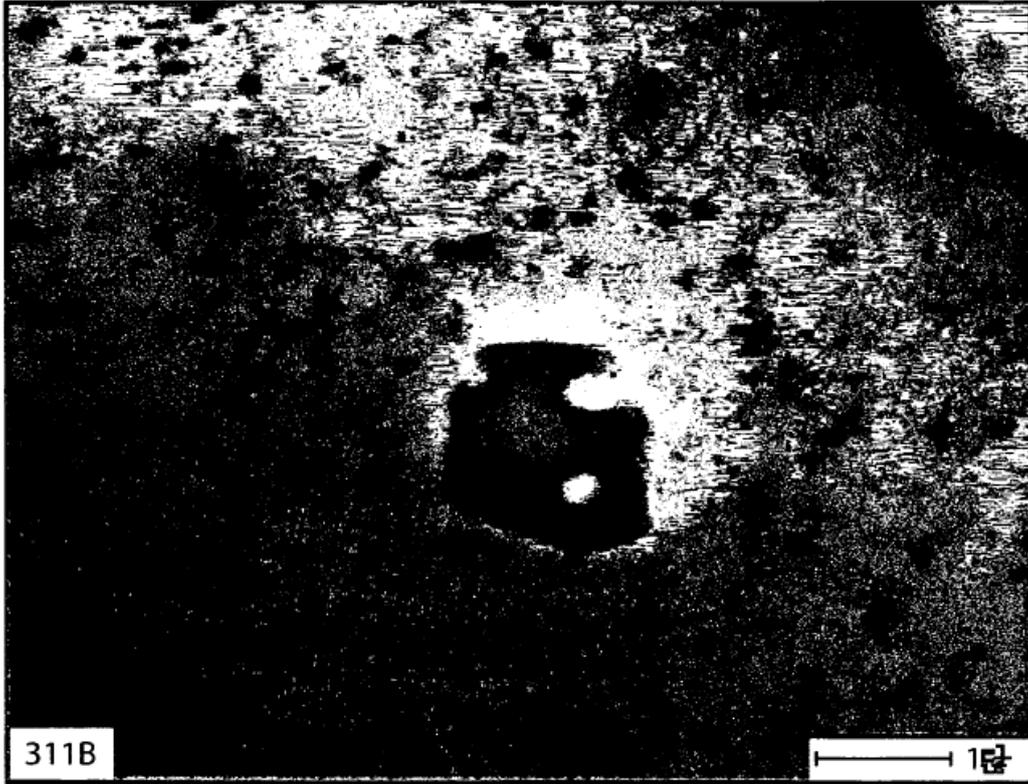


Fig. 29

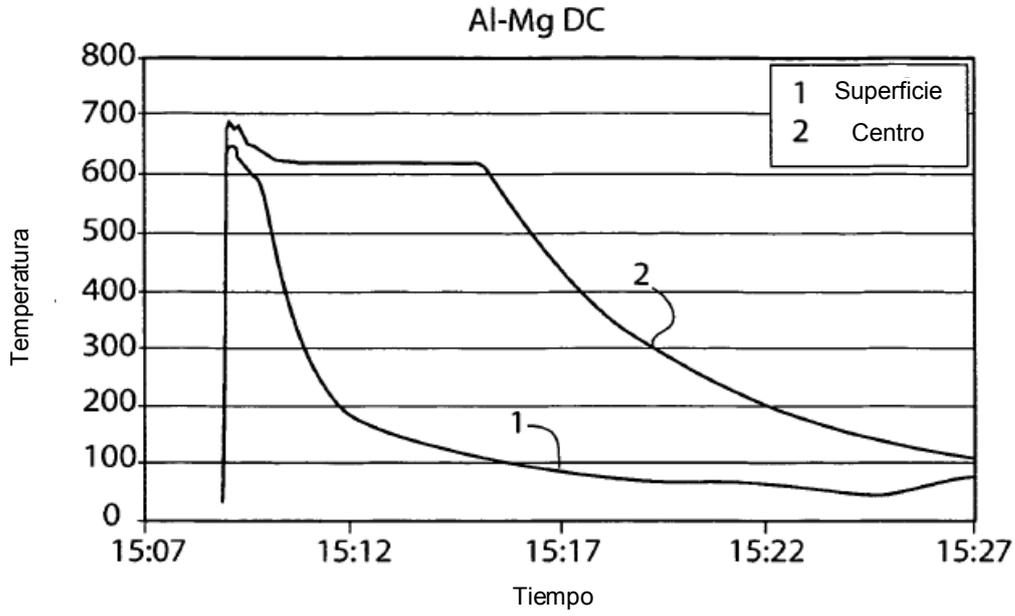


Fig. 30

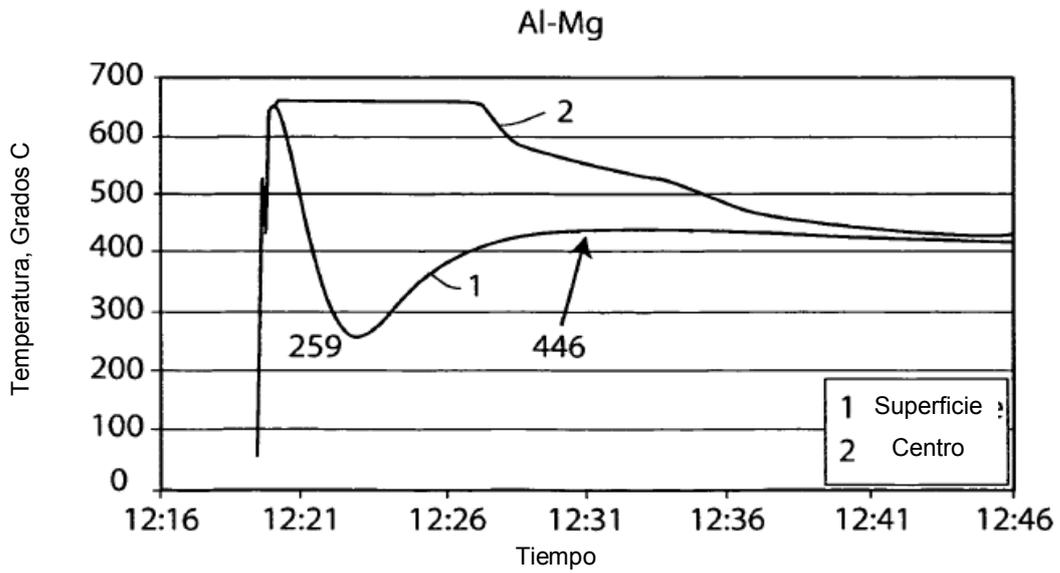


Fig. 31

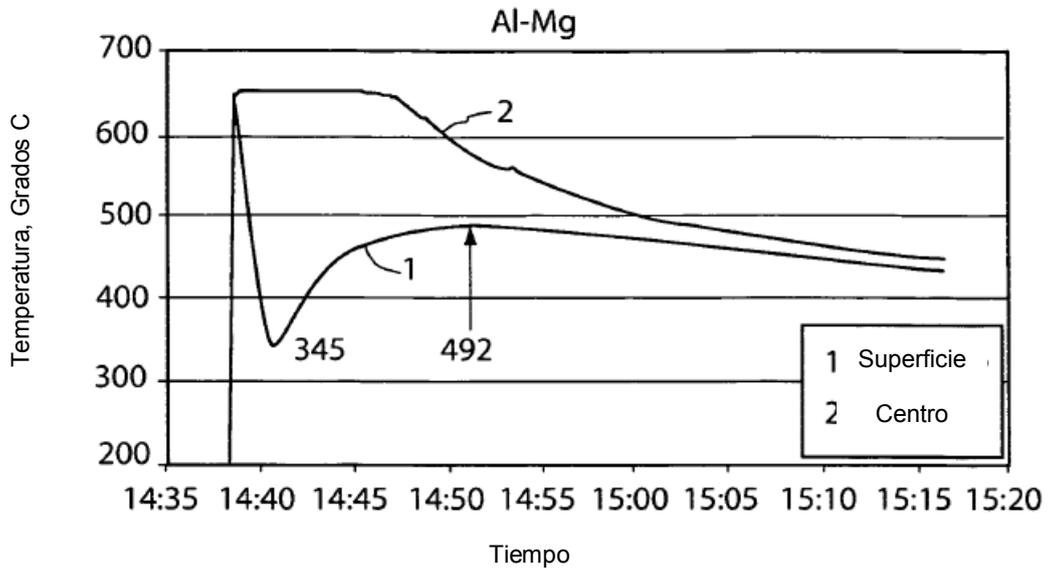


Fig. 32

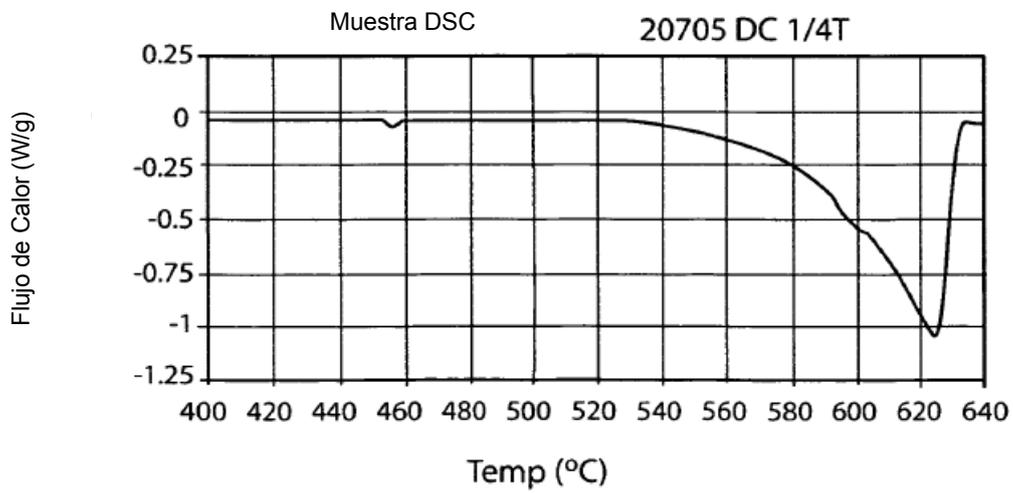


Fig. 33

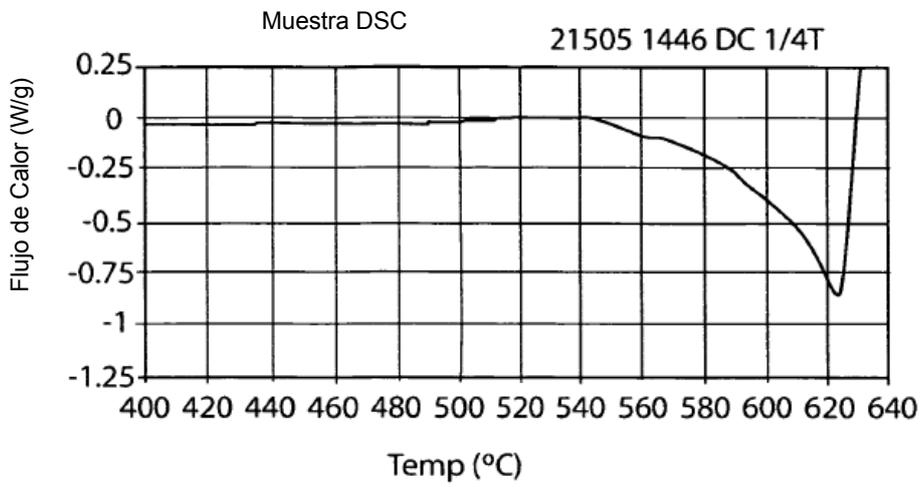


Fig. 34

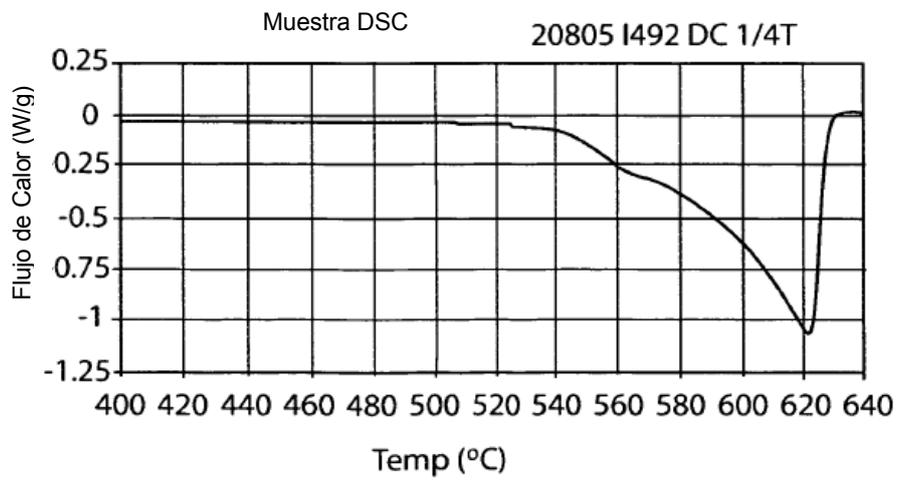


Fig. 35