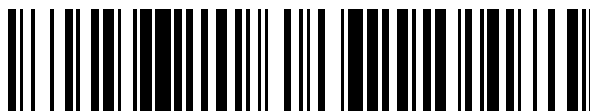


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 864 636**

51 Int. Cl.:

<b>C21D 8/00</b>	(2006.01)
<b>C21D 9/00</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/02</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/04</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/34</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/38</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.10.2014 PCT/US2014/062647**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.05.2015 WO15066022**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.10.2014 E 14859031 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.12.2020 EP 3063305**

54 Título: **Producción de acero metálico por fundición de planchones**

30 Prioridad:

**28.10.2013 US 201361896594 P**

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

**14.10.2021**

73 Titular/es:

**THE NANOSTEEL COMPANY, INC. (100.0%)  
272 West Exchange Street, Suite 300  
Providence, RI 02903, US**

72 Inventor/es:

**BRANAGAN, DANIEL JAMES;  
GRANT, JUSTICE G.;  
BALL, ANDREW T.;  
WALLESER, JASON K.;  
MEACHAM, BRIAN E.;  
CLARK, KURTIS;  
MA, LONGZHOU;  
YAKUBTSOV, IGOR;  
LARISH, SCOTT;  
CHENG, SHENG;  
GIDDENS, TAYLOR L.;  
FRERICHS, ANDREW E. y  
SERGUEEVA, ALLA V.**

74 Agente/Representante:

**SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio**

**ES 2 864 636 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**

Producción de acero metálico por fundición de planchones

5 Campo de invención

Esta aplicación se ocupa de las aleaciones metálicas y los métodos de procesamiento con aplicación a los métodos de fundición de planchones con etapas de procesamiento posterior hacia la producción de láminas. Estos metales proporcionan estructuras únicas y exhiben combinaciones de propiedades avanzadas de alta resistencia y/o alta ductilidad.

Antecedentes

15 Los aceros han sido usados por la humanidad durante al menos 3000 años y se usan ampliamente en la industria, que comprende más del 80 % en peso de todas las aleaciones metálicas en uso industrial. La tecnología del acero existente se basa en manipular la transformación eutectoide. La primera etapa es calentar la aleación en la región monofásica (austenita) y luego enfriar o templar el acero a varias velocidades de enfriamiento para formar estructuras multifase que a menudo son combinaciones de ferrita, austenita y cementita. En dependencia de cómo se enfríe el acero, se puede obtener una amplia variedad de microestructuras características (es decir, perlita, bainita y martensita) con una amplia gama de propiedades. Esta manipulación de la transformación eutectoide ha dado como resultado la amplia variedad de aceros disponibles en la actualidad.

25 Actualmente, hay más de 25 000 equivalentes en todo el mundo en 51 grupos de metales de aleación ferrosa diferentes. Para el acero, que se produce en forma de lámina, se pueden emplear amplias clasificaciones basadas en las características de resistencia a la tracción. Los Aceros de Baja Resistencia (LSS) pueden entenderse aquí como que exhiben resistencias a la tracción inferiores a 270 MPa e incluyen tipos tales como aceros intersticiales libres y suaves. Los Aceros de Alta Resistencia (HSS) pueden entenderse en la presente descripción como que exhiben resistencias a la tracción de 270 a 700 MPa e incluyen tipos tales como aceros de alta resistencia y baja aleación, libres de intersticiales de alta resistencia y aceros que se pueden endurecer por horneado. Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS) pueden entenderse en la presente descripción como que tienen resistencias a la tracción superiores a 700 MPa e incluyen tipos como aceros martensíticos (MS), aceros de fase dual (DP), aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP) y aceros de fase compleja (CP). A medida que aumenta el nivel de resistencia, la ductilidad del acero generalmente disminuye. Por ejemplo, LSS, HSS y AHSS pueden indicar alargamientos por tracción a niveles de 25 % a 55 %, 10 % a 45 % y 4 % a 30 %, respectivamente.

35 La producción de material de acero en los Estados Unidos es actualmente de aproximadamente 100 millones de toneladas por año por un valor de aproximadamente \$ 75 mil millones. De acuerdo con el Instituto Americano del Hierro y el Acero, el 24 % de la producción de acero estadounidense se usa en la industria automotriz. El acero total en el vehículo promedio de 2010 fue aproximadamente del 60 %. Los nuevos aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) representan el 17 % del vehículo y se espera que crezca hasta un 300 % para el año 2020. [American Iron and Steel Institute. (2013). Perfil 2013. Washington D.C.]

45 La fundición continua, también llamada fundición de hebras, es el proceso mediante el cual el metal fundido se solidifica en una barra, lupia o planchón "semiacabada" para la laminación posterior en los laminadores de acabado. Antes de la introducción de la fundición continua en la década de 1950, el acero se vertía en moldes estacionarios para formar lingotes. Desde entonces, la "fundición continua" ha evolucionado para lograr un mejor rendimiento, calidad, productividad y rentabilidad. Permite la producción a menor costo de secciones metálicas con mejor calidad, debido a los costos inherentemente más bajos de la producción continua y estandarizada de un producto, además de proporcionar un mayor control sobre el proceso a través de la automatización. Este proceso se usa con mayor frecuencia para fundir acero (en términos de tonelaje fundido). La fundición continua de planchones con un tren de laminación en caliente en línea o una laminación en caliente separada posterior es una etapa importante del procesamiento posterior para producir bobinas de lámina. Los planchones gruesos se funden típicamente de 150 a 500 mm de grosor y luego se dejan enfriar a temperatura ambiente. La laminación en caliente posterior de los planchones después del precalentamiento en hornos de túnel se realiza en varias etapas a través de trenes de laminación en caliente y de desbaste para llegar a grosores típicamente de 2 a 10 mm de grosor. Las piezas de fundición de planchones delgadas comienzan con un grosor de fundición de 20 a 150 mm y luego generalmente se sigue a través de la laminación en caliente en línea en una serie de etapas en secuencia para llegar a grosores típicamente de 2 a 10 mm. Existen muchas variaciones de esta técnica, como la fundición en grosores de 100 a 300 mm para producir planchones de grosor intermedio que posteriormente se laminan en caliente. Además, se conocen otros procesos de fundición, incluidos los procesos de fundición de correa simple y doble que producen grosores de fundición en el rango de 5 a 100 mm de grosor y que generalmente se laminan en caliente en línea para reducir el grosor de calibre a niveles específicos para la producción de bobinas. En la industria automotriz, el conformado de piezas a partir de materiales laminares a partir de bobinas se logra a través de muchos procesos que incluyen doblado, conformado por prensado en caliente y frío, estirado o laminación de forma adicional. Los documentos US 2013/233452 A1, US 8 257 512 B1, US 2001/004910 A1 y WO 2013/119334 A1 describen métodos de la técnica anterior para proporcionar acero.

Resumen

La presente descripción se refiere a un método de producción. El método comprende

- 5 a. suministrar una aleación de metal que comprende Fe en un nivel de 61,0 a 88,0 por ciento atómico, Si en un nivel de 0,5 a 9,0 por ciento atómico, Mn en un nivel de 0,9 a 19,0 por ciento atómico, Ni en un nivel de 0,1 a 9,0 por ciento atómico, Cr a un nivel de 0,1 a 19,0 por ciento atómico, C a un nivel de 0,1 a 4,0 por ciento atómico, opcionalmente Cu a un nivel de 0,1 a 4,0 por ciento atómico, e impurezas, en donde dicha aleación de metal está libre de boro,
- 10 b. fundir dicha aleación de metal y enfriar y solidificar y formar una aleación solidificada que tenga un grosor mayor o igual a 20 mm y hasta 500 mm y un límite de elasticidad de 300 MPa a 600 MPa, en donde dicha aleación solidificada tiene un punto de fusión ( $T_m$ )
- 15 c. calentar dicha aleación solidificada a una temperatura de 700 °C por debajo de dicha aleación  $T_m$  y reducir dicho grosor de dicha aleación solidificada a una velocidad de deformación de  $10^{-6}$  a  $10^4$  s $^{-1}$  para proporcionar una primera aleación resultante que tenga un límite de elasticidad de 200 MPa hasta 1000 MPa; y
- 20 d. tensar la primera aleación resultante por encima de dicho límite de elasticidad para proporcionar una segunda aleación resultante que tiene un grosor de 0,1 mm a 25,0 mm, en donde la segunda aleación resultante tiene una resistencia a la tracción de 400 MPa a 1825 MPa y un alargamiento de 2,4 a 78,1 %.

25 Por consiguiente, las aleaciones producidas por el método tienen aplicación a procesos de fundición continua que incluyen fundición de correa, fundición de banda delgada/rodillo doble, fundición de planchón delgada y fundición de planchón gruesa. Las aleaciones encuentran una aplicación particular en vehículos, como bastidores de vehículos, collares de perforación, tubería de perforación, revestimiento de tubería, unión de herramientas, boca de pozo, tanques de almacenamiento de gas comprimido o bidones de gas natural licuado.

30 Breve Descripción De Los Dibujos

La descripción detallada a continuación puede entenderse mejor con referencia a las figuras adjuntas que se proporcionan con fines ilustrativos y no deben considerarse como limitantes de ningún aspecto de esta invención.

35 La Figura 1 ilustra un diagrama de flujo del proceso de fundición continua de planchones.

La Figura 2 ilustra un ejemplo de diagrama de flujo del proceso de fundición de planchones delgadas que muestra las etapas de producción de lámina de acero.

40 La Figura 3 ilustra un proceso de laminación en caliente (frío).

La Figura 4 ilustra la formación de aleaciones de acero Clase 1.

45 La Figura 5 ilustra un modelo de curva tensión-deformación correspondiente al comportamiento de la aleación Clase 1.

La Figura 6 ilustra la formación de aleaciones de acero Clase 2.

50 La Figura 7 ilustra un modelo de curva tensión-deformación correspondiente al comportamiento de la aleación Clase 2.

55 La Figura 8 ilustra estructuras y mecanismos en las aleaciones aplicables en la presente descripción a la producción de láminas con la identificación del Mecanismo #0 (Refinamiento Dinámico de Nanofase) que es preferentemente aplicable a la Estructura Modal (Estructura #1) que se forma en grosores mayores o iguales a 2,0 mm o con velocidades de enfriamiento inferiores o iguales a 250 K/s.

La Figura 9 ilustra un ejemplo de una curva de tensión-deformación de la Aleación 63 sin boro en estado de laminación en caliente.

60 La Figura 10 Imágenes de electrones retrodispersados de la microestructura en la Aleación 65 fundida a 50 mm de grosor: (a) tal como se ha fundido; (b) después de la laminación en caliente a 1250 °C; (c) después de la laminación en frío hasta un grosor de 1,2 mm.

# ES 2 864 636 T3

## Descripción Detallada

### Fundición Continua de Planchones

Un planchón es una longitud de metal que tiene una sección transversal rectangular. Los planchones se pueden producir directamente mediante fundición continua y, por lo general, se procesan además mediante diferentes procesos (laminación en caliente/frío, laminación de piel, tratamiento térmico por lotes, tratamiento térmico continuo, etc.). Los productos finales comunes incluyen láminas de metal, placas, bandas de metal, tuberías y tubos.

### Descripción de la Fundición de Planchón Gruesa

La fundición de planchones gruesas es el proceso mediante el cual el metal fundido se solidifica en un planchón "semiacabado" para la laminación posterior en los molinos de acabado. En el proceso de fundición continua ilustrado en la Figura 1, el acero fundido fluye desde una cuchara de fundición, a través de una artesa hasta el molde. Una vez en el molde, el acero fundido se congela contra las paredes del molde de cobre refrigerado por agua para formar una cáscara sólida. Los rodillos impulsores situados en la parte inferior de la máquina retiran continuamente la cáscara del molde a una velocidad o "velocidad de fundición" que coincide con el flujo de metal entrante, por lo que el proceso idealmente se desarrolla en estado estable. Debajo de la salida del molde, la cáscara de acero solidificado actúa como un recipiente para soportar el líquido restante. Los rodillos sostienen el acero para minimizar el abultamiento debido a la presión ferrostática. Los aerosoles de agua y aire enfrían la superficie de la hebra entre los rodillos para mantener la temperatura de la superficie hasta que el núcleo fundido es sólido. Una vez que el centro es completamente sólido (en la "longitud metalúrgica"), la hebra puede cortarse con soplete en planchones con un grosor típico de 150 a 500 mm. Para producir láminas delgadas a partir de planchones, deben someterse a laminación en caliente con una reducción sustancial que forma parte del procesamiento posterior. La laminación en caliente se puede realizar en ambos rodillos de desbaste que a menudo son reversibles al permitir múltiples pasadas y con rellenos de acabado con típicamente de 5 a 7 soportes en serie. Después de la laminación en caliente, el grosor de la lámina resultante está típicamente en el rango de 2 a 5 mm. Normalmente, se produciría una reducción adicional del calibre a través de la laminación en frío posterior.

### Descripción de la Fundición de Planchón Delgada

En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso de fundición de planchones delgadas. El proceso de fundición de planchones delgadas se puede dividir en tres etapas. En la Etapa 1, el acero líquido se moldea y lamina de manera casi simultánea. El proceso de solidificación comienza al forzar el líquido fundido a través de un molde de cobre o aleación de cobre para producir un grosor inicial típicamente de 50 a 110 mm de grosor, pero esto se puede variar (es decir, de 20 a 150 mm) según la capacidad de procesamiento del metal líquido y la velocidad de producción. Casi inmediatamente después de salir del molde y mientras el núcleo interior de la lámina de acero todavía está líquido, la lámina se somete a una reducción mediante el uso de un soporte de laminación de varias etapas que reduce el grosor significativamente hasta 10 mm en dependencia de los objetivos finales de grosor de la lámina. En la Etapa 2, la lámina de acero se calienta al pasar por uno o dos hornos de inducción y durante esta etapa se homogeneiza el perfil de temperatura y la estructura metalúrgica. En la Etapa 3, la lámina se lamina adicionalmente hasta el objetivo de grosor de calibre final que puede estar en el rango de grosor de 0,5 a 15 mm. Normalmente, durante el proceso de laminación en caliente, la reducción de calibre se realizará en 5 a 7 etapas a medida que la lámina se reduce a través de 5 a 7 rodillos en serie. Inmediatamente después de la laminación, la banda se enfría en una mesa de salida para controlar el desarrollo de la microestructura final de la lámina antes de enrollarla en un rodillo de acero.

Si bien el proceso de tres etapas de formación de láminas en fundición de planchón delgada es parte del proceso, la respuesta de las aleaciones de este documento a estas etapas es única en función de los mecanismos y tipos de estructura descritos en la presente descripción y las nuevas combinaciones de propiedades resultantes.

### Métodos de Procesamiento posterior

#### Laminación en Caliente

El acero laminado en caliente se conforma mientras está al rojo vivo y luego se deja enfriar. La laminación plana es la forma más básica de laminación, el material inicial y final que tienen una sección transversal rectangular. La ilustración esquemática de un proceso de laminación de láminas metálicas se presenta en la Figura 3. La laminación en caliente es parte de la producción de láminas para reducir el grosor de la lámina hacia los valores objetivo mediante el uso de la ductilidad mejorada de la lámina metálica a temperatura elevada cuando se puede lograr un alto nivel de reducción de laminación. La laminación en caliente puede ser parte del proceso de fundición cuando se incorporan en línea uno (Fundición de Banda Delgada) o varios soportes (Fundición de Planchón Delgada). En un caso de Fundición de Planchón Gruesa (Tradicional), el planchón se recalienta primero en un horno de túnel y luego se mueve a través de una serie de rodillos (Figura 3). Para producir láminas con un grosor específico, también se aplica la laminación en caliente como parte del procesamiento posterior en Líneas de Producción de Tren de Laminación en Caliente separadas. Dado que el acero al rojo vivo se contrae cuando se enfría, la superficie del metal es ligeramente rugosa y el grosor puede variar unas milésimas de pulgada. Por lo general, la laminación en frío es una etapa siguiente para mejorar la calidad en el producto de lámina final.

Laminación en frío

El acero laminado en frío se fabrica al pasar material de acero frío a través de rodillos pesados que comprimen el metal a su forma y dimensión finales. Es una etapa común del procesamiento posterior durante la producción de láminas cuando se pueden usar diferentes rodillos de laminación en frío en dependencia de las propiedades del material, el objetivo de laminación en frío y los parámetros específicos. Cuando el material laminado se somete a laminación en frío, aumenta su resistencia, dureza y el límite de elasticidad. Sin embargo, la ductilidad de la lámina de metal disminuye debido al endurecimiento por deformación, lo que hace que el metal sea más frágil. Como tal, el metal debe recocerse/calentarse de vez en cuando entre pasadas durante la operación de laminación para eliminar los efectos indeseables de la deformación en frío y aumentar la capacidad de conformación del metal. Por tanto, la obtención de una gran reducción de grosor puede llevar mucho tiempo y dinero. En muchos casos, se usan trenes de laminación en frío de varios soportes con recocido en línea en los que la lámina se ve afectada por una temperatura elevada durante un corto periodo de tiempo (generalmente de 2 a 5 min) por calentamiento por inducción mientras se mueve a lo largo de la línea de laminación. La laminación en frío permite una precisión dimensional mucho más precisa y los productos de lámina final tienen una superficie más lisa (mejor acabado superficial) que los de la laminación en caliente.

Tratamiento Térmico

Para obtener las propiedades mecánicas deseadas, generalmente se implementa el recocido posterior al procesamiento de los materiales en láminas. Normalmente, el recocido de productos de lámina de acero se realiza de dos formas a escala comercial: recocido por lotes o recocido continuo. Durante un proceso de recocido por lotes, bobinas masivas de las láminas se calientan y enfrían lentamente en hornos con atmósfera controlada. El tiempo de recocido puede ser de varias horas a varios días. Debido a la gran masa de las bobinas, que normalmente puede tener un tamaño de 5 a 25 toneladas, las partes interior y exterior de las bobinas experimentarán diferentes historias térmicas en un horno de recocido por lotes, lo que puede dar lugar a diferencias en las propiedades resultantes. En el caso de un proceso de recocido continuo, las láminas de acero desenrolladas pasan por un equipo de calentamiento y enfriamiento durante varios minutos. El equipo de calentamiento suele ser un horno de dos etapas. La primera etapa es el tratamiento térmico a alta temperatura que proporciona la recristalización de la microestructura. La segunda etapa es el tratamiento térmico a baja temperatura y ofrece el envejecimiento artificial de la microestructura. Una combinación adecuada de las dos etapas del tratamiento térmico general durante el recocido continuo proporciona las propiedades mecánicas objetivo. Las ventajas del recocido continuo sobre el recocido por lotes convencional son las siguientes: uniformidad mejorada del producto; limpieza y forma de la superficie; capacidad para producir una amplia gama de grados de acero.

Estructuras y mecanismos

La siguiente descripción del acero de Clase 1 y Clase 2 simplemente sirve para proporcionar información de fondo y no forma parte de la invención que se da en las reivindicaciones. Las aleaciones de acero de la presente invención son tales que inicialmente son capaces de formar lo que se describe en la presente descripción como acero de Clase 1 o Clase 2, que son preferentemente cristalinos (no vítreos) con tamaño de grano y morfología cristalinos identificables.

Acero Clase 1

La formación de acero de Clase 1 en la presente descripción se ilustra en la Figura 4. Como se muestra allí, inicialmente se forma una estructura modal cuya estructura modal es el resultado de comenzar con una fusión líquida de la aleación y solidificar por enfriamiento, lo que proporciona la nucleación y el crecimiento de fases particulares que tienen tamaños de grano particulares. Por lo tanto, la referencia en la presente descripción a modal puede entenderse como una estructura que tiene al menos dos distribuciones de tamaño de grano. El tamaño de grano en la presente descripción puede entenderse como el tamaño de un monocristal de una fase particular específica preferentemente identificable por métodos tales como microscopía electrónica de barrido o microscopía electrónica de transmisión. En consecuencia, la Estructura #1 del Acero Clase 1 se puede lograr preferentemente mediante el procesamiento a través de procedimientos a escala de laboratorio como se muestra y/o mediante métodos a escala industrial que involucran metodología de procesamiento de superficie fría, como procesamiento de rodillo doble, fundición de planchón delgada o fundición de planchón gruesa. Por lo tanto, la estructura modal del Acero Clase 1 indicará inicialmente, cuando se enfríe desde la masa fundida, los siguientes tamaños de grano: (1) tamaño de grano de la matriz de 500 nm a 20 000 nm que contiene austenita y/o ferrita; (2) tamaño de grano de boruro de 25 nm a 5000 nm (es decir, granos no metálicos como  $M_2B$  donde M es el metal y está unido covalentemente a B). Los granos de boruro también pueden ser preferentemente fases de tipo "anclaje" que hace referencia a la característica de que los granos de la matriz se estabilizarán eficazmente por las fases de anclaje que resisten el engrosamiento a temperatura elevada. Tenga en cuenta que se ha identificado que los granos de boruro metálico exhiben la estequiometría  $M_2B$ , pero es posible otra estequiometría y pueden proporcionar anclaje, incluidos  $M_3B$ , MB ( $M_1B_1$ ),  $M_{23}B_6$  y  $M_7B_3$ .

La Estructura Modal del Acero Clase 1 puede deformarse mediante procesos termomecánicos y someterse a varios tratamientos térmicos, lo que da como resultado alguna variación en las propiedades, pero la estructura modal puede mantenerse.

5 Cuando el Acero Clase 1 indicado anteriormente se expone a un esfuerzo de tracción, el diagrama de esfuerzo versus deformación observado se ilustra en la Figura 5. Por lo tanto, se observa que la estructura modal sufre lo que se identifica como Precipitación Nanofásica Dinámica que conduce a una estructura de segundo tipo para el Acero Clase 1. Por lo tanto, dicha Precipitación Nanofásica Dinámica se activa cuando la aleación experimenta un rendimiento bajo esfuerzo, y se ha encontrado que el límite de elasticidad de los Aceros Clase 1 que experimentan Precipitación Nanofásica Dinámica puede ocurrir preferentemente de 300 MPa a 840 MPa. Por consiguiente, se puede apreciar que la Precipitación Nanofásica Dinámica se produce debido a la aplicación de un esfuerzo mecánico que excede dicho límite de elasticidad indicado. La Precipitación Nanofásica Dinámica en sí puede entenderse como la formación de una fase identificable adicional en el Acero Clase 1 que se denomina fase de precipitación con un tamaño de grano asociado. Es decir, el resultado de dicha Precipitación Nanofásica Dinámica es formar una aleación que todavía indica un tamaño de grano de matriz identificable de 500 nm a 20 000 nm, un tamaño de grano de anclaje de boruro de 20 nm a 10 000 nm, junto con la formación de granos de precipitación de fases hexagonales con 1,0 nm a 200 nm de tamaño. Como se indicó anteriormente, los tamaños de grano por lo tanto no se vuelven más gruesos cuando la aleación está sometida a esfuerzos, pero conducen al desarrollo de los granos de precipitación como se indicó.

La referencia a las fases hexagonales puede entenderse como una fase dihexagonal de clase piramidal dihexagonal con un grupo espacial P63mc (# 186) y/o una clase dipiramidal ditrigonal con un grupo espacial hexagonal P6bar2C (#190). Además, las propiedades mecánicas de este segundo tipo de estructura del Acero Clase 1 son tales que se observa que la resistencia a la tracción cae en el rango de 630 MPa a 1150 MPa, con un alargamiento del 10 al 40 %. Además, la estructura del segundo tipo de Acero Clase 1 es tal que exhibe un coeficiente de endurecimiento por deformación entre 0,1 y 0,4 que es casi plano después de experimentar el rendimiento indicado. El coeficiente de endurecimiento por deformación se refiere al valor de n en la fórmula  $\sigma = K\epsilon^n$ , donde  $\sigma$  representa el esfuerzo aplicado sobre el material,  $\epsilon$  es la deformación y K es el coeficiente de resistencia. El valor del exponente de endurecimiento por deformación n se encuentra entre 0 y 1. Un valor de 0 significa que la aleación es un sólido perfectamente plástico (es decir, el material sufre cambios irreversibles a la fuerza aplicada), mientras que un valor de 1 representa un sólido 100 % elástico (es decir, el material sufre cambios reversibles a una fuerza aplicada). La Tabla 1 a continuación proporciona una comparación y un resumen de rendimiento para el Acero Clase 1 en la presente descripción.

**Tabla 1 Comparación de Estructura y Rendimiento para Acero de Clase 1**

Propiedad / Mecanismo	Acero Clase 1	
	Estructura # 1 Estructura Modal	Estructura # 2 Estructura de Nanofase Modal
<b>Formación de Estructuras</b>	Comienzo con un líquido fundido, que solidifica este líquido fundido y forma directamente	Precipitación Nanofásica Dinámica que se produce mediante la aplicación de esfuerzo mecánico
<b>Transformaciones</b>	Solidificación líquida seguida de nucleación y crecimiento	Transformación inducida por esfuerzo que involucra formación de fases y precipitación
<b>Habilitación de Fases</b>	Austenita y/o ferrita con anclaje de boruro (si está presente)	Austenita, opcionalmente ferrita, fases de anclaje de boruro (si está presente) y precipitación de fase (s) hexagonal
<b>Tamaño de Grano de la Matriz</b>	500 a 20 000 nm Austenita y/o ferrita	500 a 20 000 nm Austenita opcionalmente ferrita
<b>Tamaño de Boruro (si está presente)</b>	25 a 5000 nm No metálico (por ejemplo, boruro metálico)	20 a 10000 nm No metálico (por ejemplo, boruro metálico)
<b>Tamaño del Grano de Precipitación</b>	-	1 nm a 200 nm Fase (s) hexagonales
<b>Respuesta a la Tracción</b>	Estructura intermedia; se transforma en la Estructura # 2 cuando se somete a rendimiento	Real con propiedades logradas según el tipo de estructura #2
<b>Límite de elasticidad</b>	300 hasta 600 MPa	300 hasta 840 MPa
<b>Resistencia a la Tracción</b>	-	630 hasta 1150 MPa
<b>Alargamiento Total</b>	-	10 a 40 %
<b>Respuesta al Endurecimiento por Deformación</b>	-	Muestra un coeficiente de endurecimiento por deformación entre 0,1 y 0,4 y un coeficiente de endurecimiento por deformación en función de la deformación que es casi plana o experimenta un aumento lento hasta la falla

## Acero Clase 2

La formación de Acero Clase 2 en la presente descripción se ilustra en la Figura 6. El acero Clase 2 también puede formarse en la presente descripción a partir de las aleaciones identificadas, lo que implica dos nuevos tipos de estructura después de comenzar con la Estructura #1, Estructura Modal, seguida de dos nuevos mecanismos identificados en la presente descripción como Refinamiento Estático de Nanofase y Fortalecimiento Dinámico de Nanofase. Los tipos de estructura para el Acero Clase 2 se describen en la presente descripción como Estructura Nanomodal y Estructura Nanomodal de Alta Resistencia. En consecuencia, el Acero Clase 2 en la presente descripción se puede caracterizar de la siguiente manera: Estructura #1 - Estructura Modal (Etapa #1), Mecanismo #1 - Refinamiento Estático de Nanofase (Etapa #2), Estructura #2 - Estructura Nanomodal (Etapa #3), Mecanismo #2 - Fortalecimiento Dinámico de Nanofases (Etapa #4) y Estructura #3 - Estructura Nanomodal de Alta Resistencia (Etapa #5).

Como se muestra allí, la Estructura #1 se forma inicialmente en la que la Estructura Modal es el resultado de comenzar con una fusión líquida de la aleación y solidificarse por enfriamiento, lo que proporciona la nucleación y el crecimiento de fases particulares que tienen tamaños de grano particulares. El tamaño de grano en la presente descripción puede entenderse de nuevo como el tamaño de un monocristal de una fase particular específica preferentemente identificable por métodos tales como microscopía electrónica de barrido o microscopía electrónica de transmisión. En consecuencia, la Estructura #1 del Acero Clase 2 se puede lograr preferentemente mediante el procesamiento a través de procedimientos a escala de laboratorio como se muestra y/o mediante métodos a escala industrial que involucran metodología de procesamiento de superficie fría, como procesamiento de rodillo doble o fundición de planchón delgada.

Por lo tanto, la Estructura Modal del Acero Clase 2 indicará inicialmente, cuando se enfríe de la masa fundida, los siguientes tamaños de grano: (1) tamaño de grano de la matriz de 200 nm a 200 000 nm que contiene austenita y/o ferrita; (2) tamaños de grano de boruro, si están presentes, de 10 nm a 5000 nm (es decir, granos no metálicos como  $M_2B$  donde M es el metal y está unido covalentemente a B). Los granos de boruro también pueden ser preferentemente fases de tipo "anclaje" que se refieren a la característica de que los granos de la matriz serán efectivamente estabilizados por las fases de anclaje que resisten el engrosamiento a temperatura elevada. Tenga en cuenta que se ha identificado que los granos de boruro metálico exhiben la estequiometría  $M_2B$ , pero es posible otra estequiometría y pueden proporcionar anclaje, incluidos  $M_3B$ , MB ( $M_1B_1$ ),  $M_{23}B_6$  y  $M_7B_3$  y que no se ven afectados por los Mecanismos #1 o #2 mencionados anteriormente. La referencia al tamaño de grano debe entenderse nuevamente como el tamaño de un monocristal de una fase particular específica preferentemente identificable por métodos tales como microscopía electrónica de barrido o microscopía electrónica de transmisión. Además, la Estructura #1 de acero Clase 2 en la presente descripción incluye austenita y/o ferrita junto con dichas fases de boruro.

En la Figura 7, se muestra una curva de tensión-deformación que representa las aleaciones de acero de la presente descripción que experimentan un comportamiento de deformación del acero Clase 2. La Estructura Modal se crea preferentemente primero (Estructura #1) y luego, después de la creación, la Estructura Modal ahora se puede refinar únicamente a través del Mecanismo #1, que es un mecanismo de Refinamiento Estático de Nanofase, que conduce a la Estructura #2. El Refinamiento Estático de Nanofase se refiere a la característica de que los tamaños de grano de la matriz de la Estructura #1 que inicialmente se encuentran en el rango de 200 nm a 200 000 nm se reducen en tamaño para proporcionar la Estructura 2 que tiene tamaños de grano de matriz que típicamente caen en el rango de 50 nm a 5000 nm. Tenga en cuenta que la fase de anclaje de boruro, si está presente, puede cambiar de tamaño significativamente en algunas aleaciones, mientras que está diseñada para resistir el engrosamiento del grano de la matriz durante los tratamientos térmicos. Debido a la presencia de estos sitios de anclaje de boruro, se esperaría que el movimiento de los límites de un grano que conduce al engrosamiento sea retardado por un proceso llamado anclaje Zener o arrastre Zener. Así, mientras que el crecimiento de grano de la matriz puede ser energéticamente favorable debido a la reducción del área interfacial total, la presencia de la fase de anclaje de boruro contrarrestará esta fuerza impulsora de engrosamiento debido a las altas energías interfaciales de estas fases.

La característica del Refinamiento Estático de Nanofase (mecanismo #1) en el acero de Clase 2, si hay boruros, es tal que la fase de austenita de escala micrométrica ( $\gamma$ -Fe), que se notó como que cae en el rango de 200 nm a 200 000 nm, es parcialmente o completamente transformado en nuevas fases (por ejemplo, ferrita o  $\alpha$ -Fe) a temperatura elevada. La fracción de volumen de ferrita (hierro  $\alpha$ ) inicialmente presente en la estructura modal (Estructura 1) del acero de Clase 2 es de 0 a 45 %. La fracción de volumen de ferrita ( $\alpha$ -hierro) en la Estructura #2 como resultado del Refinamiento de Nanofase Estática (Mecanismo #2) es típicamente de 20 a 80 % a temperatura elevada y luego vuelve a austenita ( $\gamma$ -hierro) al enfriarse a producir típicamente de 20 a 80 % de austenita a temperatura ambiente. La transformación estática se produce preferentemente durante el tratamiento térmico a temperatura elevada y, por tanto, implica un mecanismo de refinamiento único, ya que el engrosamiento del grano en lugar del refinamiento del grano es la respuesta convencional del material a temperatura elevada.

En consecuencia, si están presentes boruros, el engrosamiento del grano no se produce con las aleaciones de Acero Clase 2 de la presente descripción durante el mecanismo de Refinamiento Estático de Nanofase. La Estructura #2 es capaz de transformarse de forma única en la Estructura #3 durante el Fortalecimiento Dinámico de

Nanofase y como resultado se forma la Estructura #3 e indica valores de resistencia a la tracción en el rango de 400 a 1825 MPa con un alargamiento total de 2,4 a 78,1 %.

En dependencia de la química de la aleación, se pueden formar precipitados a nanoescala durante el refinamiento estático en nanofase y el posterior proceso térmico en algunos de los aceros de alta resistencia que no son inoxidables. Los nanoprecipitados están en el rango de 1 nm a 200 nm, con la mayoría (> 50 %) de estas fases 10 ~ 20 nm de tamaño, que son mucho más pequeños que los granos de la matriz o la fase de anclaje de boruro formada en la Estructura #1 para retardar el engrosamiento del grano de la matriz cuando está presente. Además, durante el Refinamiento Estático de Nanofase, los granos de boruro, si están presentes, se encuentran en un rango de 20 a 10 000 nm de tamaño.

Al ampliar lo anterior, en el caso de las aleaciones en la presente descripción que proporcionan Acero Clase 2, cuando dichas aleaciones superan su límite de fluencia, se produce una deformación plástica a esfuerzo constante seguido de una transformación de fase dinámica que conduce a la creación de la Estructura #3. Más específicamente, después de que se induce suficiente tensión, se produce un punto de inflexión donde la pendiente de la curva de esfuerzo frente a tensión cambia y aumenta (Figura 7) y la resistencia aumenta con la tensión, lo que indica una activación del Mecanismo #2 (Fortalecimiento Dinámico de Nanofase).

Con mayor esfuerzo durante el Fortalecimiento Dinámico Nanofásico, la fuerza aumenta, pero con una disminución gradual en el valor del coeficiente de endurecimiento por deformación hasta casi fallar. Se produce algo de ablandamiento por deformación, pero solo cerca del punto de rotura, lo que puede deberse a reducciones en el área de la sección transversal localizada en el estrechamiento. Tenga en cuenta que la transformación de fortalecimiento que ocurre en el material que se esfuerza bajo el esfuerzo generalmente define el Mecanismo #2 como un proceso dinámico, que conduce a la Estructura #3. Por dinámico, se entiende que el proceso puede ocurrir mediante la aplicación de un esfuerzo que excede el límite de elasticidad del material. Las propiedades a tracción que se pueden lograr para las aleaciones que logran la Estructura 3 incluyen valores de resistencia a la tracción en el rango de 400 a 1825 MPa y un alargamiento total del 2,4 % al 78,1 %. El nivel de propiedades a tracción alcanzado también depende de la cantidad de transformación que se produce a medida que aumenta la deformación correspondiente a la curva característica de tensión y deformación de un acero Clase 2.

Por lo tanto, en dependencia del nivel de transformación, el límite de elasticidad ajustable ahora también se puede desarrollar en el Acero Clase 2 en la presente descripción en dependencia del nivel de deformación y en la Estructura #3 el límite de elasticidad puede variar en última instancia de 200 MPa a 1650 MPa. Es decir, los aceros convencionales fuera del alcance de las aleaciones aquí exhiben solo niveles relativamente bajos de endurecimiento por deformación, por lo que sus límites de elasticidad pueden variarse solo en pequeños rangos (por ejemplo, 100 a 200 MPa) en dependencia del historial de deformación anterior. En los aceros Clase 2 en la presente descripción, el límite de elasticidad se puede variar en un amplio rango (por ejemplo, 200 a 1650 MPa) según se aplica a la transformación de la Estructura #2 en la Estructura #3, lo que permite variaciones ajustables para permitir tanto al diseñador como a los usuarios finales en una variedad de aplicaciones y usar la Estructura #3 en diversas aplicaciones, como la gestión de choques en estructuras de carrocería de automóviles.

Con respecto a este mecanismo dinámico mostrado en la Figura 6, se observan fases de precipitación nuevas y/o adicionales que indican tamaños de grano identificables de 1 nm a 200 nm. Además, existe la identificación adicional en dicha fase de precipitación de una fase hexagonal de clase piramidal dihexagonal con un grupo espacial P63mc (# 186), una clase dipiramidal ditrigonal con un grupo espacial hexagonal P6bar2C (# 190), y/o una fase cúbica M3Si con un grupo espacial Fm3m (# 225). Por consiguiente, la transformación dinámica puede ocurrir parcial o completamente y da como resultado la formación de una microestructura con fases novedosas a nanoescala/casi a nanoescala que proporcionan una resistencia relativamente alta en el material. La estructura #3 puede entenderse como una microestructura que tiene granos de matriz de tamaño generalmente de 25 nm a 2500 nm que están anclados por fases de boruro, que están en el rango de 20 nm a 10 000 nm y con fases de precipitado que están en el rango de 1 nm a 200 nm. Nótese que en ausencia de fases de anclaje de boruro, el refinamiento puede ser algo menor y/o puede ocurrir algo de engrosamiento de la matriz que da como resultado granos de matriz que tienen un tamaño de 25 nm a 25 000 nm. La formación inicial de la fase de precipitación a la que se hace referencia anteriormente con tamaños de grano de 1 nm a 200 nm comienza en el Refinamiento Estático de Nanofase y continúa durante el Fortalecimiento Dinámico de Nanofase que conduce a la formación de la Estructura #3. La fracción de volumen de los granos de precipitación con un tamaño de 1 nm a 200 nm aumenta en la Estructura #3 en comparación con la Estructura #2 y ayuda con el mecanismo de fortalecimiento identificado. También debe notarse que en la Estructura #3, el nivel de gamma-hierro es opcional y puede eliminarse en dependencia de la química específica de la aleación y la estabilidad de la austenita. La Tabla 2 a continuación proporciona una comparación de la estructura y el rendimiento del Acero Clase 2 en la presente descripción:

Tabla 2 Comparación de Estructura y Rendimiento del Acero Clase 2, que no forma parte de la invención.

Propiedad / Mecanismo	Acero Clase 2		
	Estructura #1 Estructura Modal	Estructura #2 Estructura Nanomodal	Estructura #3 Estructura Nanomodal de Alta Resistencia
Formación de Estructuras	Comienzo con un líquido fundido, que solidifica este líquido fundido y se forma directamente	Mecanismo de Refinamiento Estático de Nanofase que se produce durante el tratamiento térmico	Mecanismo de Fortalecimiento Dinámico de Nanofase que se produce mediante la aplicación de esfuerzo mecánico
Transformaciones	Solidificación líquida seguida de nucleación y crecimiento	Transformación de fase de estado sólido de hierro gamma sobresaturado	Transformación inducida por esfuerzo que involucra formación de fases y precipitación
Habilitación de Fases	Austenita y/o ferrita con fases de anclaje de boruro (si está presente)	Fases de anclaje de ferrita, austenita, boruro (si está presente) y precipitación en fase hexagonal	Ferrita, opcionalmente austenita, fases de anclaje de boruro (si está presente), precipitación de fases hexagonales y adicionales
Tamaño de Grano de la Matriz	200 nm hasta 200 000 nm austenita	Refinamiento de grano si hay boruros presentes de 50 nm a 5000 nm	Tamaño de grano: refinamiento adicional de 25 nm a 2500 nm (si las fases de boruro no presentan refinamiento y/o engrosamiento de 25 nm a 25 000 nm)
Tamaño de Grano de Boruro (si está presente)	Boruros de 10 nm a 5000 nm (por ejemplo, boruro metálico)	Boruros de 20 nm a 10 000 nm (por ejemplo, boruro metálico)	Boruros de 20 a 10 000 nm (por ejemplo, boruro metálico)
Tamaño del Grano de Precipitación	-	1 nm hasta 200 nm	1 nm hasta 200 nm
Respuesta a la Tracción	Real con propiedades logradas basadas en el tipo de estructura #1	Estructura intermedia; se transforma en la Estructura #3 cuando se somete a rendimiento	Real con propiedades logradas basadas en la formación de estructura tipo #3 y fracción de transformación.
Límite de elasticidad	300 hasta 600 MPa	200 hasta 1000 MPa	200 hasta 1650 MPa
Resistencia a la Tracción	-	-	400 hasta 1825 MPa
Alargamiento Total	-	-	2,4 % a 78,1 %
Respuesta al Endurecimiento por Deformación	-	Después del límite de elasticidad, exhibe un ablandamiento por deformación en el esfuerzo inicial como resultado de la transformación de fase, seguido de un efecto de endurecimiento por deformación significativo que conduce a un máximo distinto	El coeficiente de endurecimiento por deformación puede variar de 0,2 a 1,0 en dependencia de la cantidad de deformación y transformación

Nuevas Rutas Para Estructura Modal

Las rutas para el desarrollo de la Formación de Estructuras Nanomodales de Alta Resistencia son las descritas en la Figura 6. En la presente descripción se describe una nueva ruta como se muestra en la Figura 8. Comienza con la Estructura #1, Estructura Modal, pero incluye el Mecanismo #0 adicional - Refinamiento Dinámico de Nanofase que conduce a la formación de la Estructura #1a - Estructura Modal Homogeneizada (Figura 8). Más específicamente, el Refinamiento Dinámico de Nanofase es la aplicación de temperatura elevada (700 °C a una temperatura justo por

debajo del punto de fusión) con esfuerzo (proporcionada por tasas de deformación de  $10^{-6}$  a  $10^4$  s<sup>-1</sup>) suficiente para causar una reducción de grosor en el metal, lo que puede ocurrir con varios procesos que incluyen laminación en caliente, forjado en caliente, prensado en caliente, perforación en caliente y extrusión en caliente. También conduce a, como se analiza con más detalle a continuación, un refinamiento de la morfología de la aleación de metal.

5 Se observa que el Refinamiento Dinámico de Nanofase que conduce a la Estructura Modal Homogeneizada ocurre en tan solo 1 ciclo (calentamiento con reducción de grosor) o después de múltiples ciclos de reducción de grosor (por ejemplo, hasta 25). La Estructura Modal Homogeneizada (Estructura 1a en la Figura 8) representa una estructura intermedia entre la Estructura Modal de partida con las propiedades y características asociadas definidas como la Estructura 1 de la Figura 8 y la Estructura Nanomodal completamente transformada definida como la Estructura 2 en la Figura 8. En dependencia de la química específica, el grosor inicial y el nivel de calentamiento y la cantidad de reducción del grosor (relacionada con la cantidad total de fuerza aplicada), la transformación puede completarse en tan solo 1 ciclo o puede tomar muchos ciclos ((por ejemplo, hasta 25) para transformarse completamente. Una estructura intermedia parcialmente transformada es la Estructura 1a o Estructura Modal Homogeneizada y después de la transformación completa de la Estructura Modal en Estructura Nanomodal, se forma la Estructura Nanomodal (es decir, la Estructura 2). Los ciclos progresivos conducen a la creación de la Estructura # 2 (Estructura Nanomodal). En dependencia del nivel de refinamiento y homogeneización logrado para una química de aleación en particular con una Estructura Modal particular, la Estructura #1a (Estructura Modal Homogeneizada) puede, por lo tanto, convertirse directamente en la Estructura #2 (Estructura Nanomodal) o puede ser tratada térmicamente y refinada aún más a través del Mecanismo #1 (Refinamiento Estático de Nanofase) para producir de manera similar la Estructura #2 (Estructura Nanomodal). Como se muestra, la Estructura #2, Estructura Nanomodal, puede entonces sufrir el Mecanismo #2 (Fortalecimiento Dinámico de Nanofase) que conduce a la formación de la Estructura #3 (Estructura Nanomodal de Alta Resistencia).

25 Vale la pena señalar que el Refinamiento Dinámico de Nanofase (Mecanismo #0) es un mecanismo que proporciona Estructura Modal Homogeneizada (Estructura # 1a) en aleaciones fundidas preferentemente en todo el volumen/grosor que hace que las aleaciones sean efectivamente insensibles a la velocidad de enfriamiento (así como insensibles al grosor) durante la solidificación inicial desde el estado líquido que permite el uso de métodos de producción como la fundición de planchón delgada o planchón gruesa para la producción de láminas. En otras palabras, se ha observado que si se forma una Estructura Modal con un grosor mayor o igual a 2,0 mm o se aplica una velocidad de enfriamiento durante la formación de la Estructura Modal que es menor o igual a 250 K/s, la etapa siguiente de Refinamiento Dinámico de Nanofase es posible que no se produzca fácilmente. Por lo tanto, la capacidad de producir una Estructura Nanomodal (Estructura #2) y, en consecuencia, la capacidad de someterse al Fortalecimiento Dinámico de Nanofase (Mecanismo #2) y formar una Estructura Nanomodal de Alta Resistencia (Estructura #3) se verá comprometida. Es decir, el refinamiento de la estructura no se producirá y dará lugar a propiedades que sean equivalentes a las obtenidas de la Estructura Modal o será ineficaz y dará lugar a propiedades que se encuentran entre las Estructuras Modales y Nanomodales.

40 Sin embargo, ahora se puede asegurar preferentemente la capacidad de formar una Estructura Nanomodal (Estructura # 2) y el consiguiente desarrollo de una Estructura Nanomodal de Alta Resistencia. Más específicamente, cuando se comienza con una Estructura Modal que se solidifica a partir de la masa fundida con un grosor mayor o igual a 2,0 mm o una Estructura Modal enfriada a una velocidad menor o igual a 250 K/s), ahora se puede proceder preferentemente con Refinamiento Dinámico de Nanofase (mecanismo #0) en Estructura Modal Homogeneizada y luego proceda con las etapas ilustradas en la Figura 8 para formar una Estructura Nanomodal de Alta Resistencia. Además, si se prepara una Estructura Modal con grosores de menos de 2 mm o con velocidades de enfriamiento de más de 250 K/s, se puede proceder preferentemente directamente con el Refinamiento Estático de Nanofase (Mecanismo #1) como se muestra en la Figura 8.

50 Como se ha identificado, el Refinamiento Dinámico de Nanofase ocurre después de que las aleaciones se someten a deformación a temperatura elevada y preferentemente ocurre en un rango de 700 °C a una temperatura justo por debajo del punto de fusión y en un rango de velocidades de deformación de  $10^{-6}$  a  $10^4$  s<sup>-1</sup>. Un ejemplo de tal deformación puede ocurrir por laminación en caliente después de fundición de planchón gruesa o planchón delgada que puede ocurrir en etapas de laminación en caliente de desbaste único o múltiple o etapas de laminación en caliente de acabado simple y/o simple o múltiple. Alternativamente, puede ocurrir en el procesamiento posterior con una amplia variedad de etapas de procesamiento en caliente que incluyen, entre otros, estampado en caliente, forjado, prensado en caliente, extrusión en caliente, etc.

#### Mecanismos Durante La Producción De Láminas

60 La formación de la Estructura Modal (Estructura #1) en las aleaciones de acero de la presente descripción puede ocurrir durante la solidificación de la aleación en Planchón Gruesa (Figura 1) o Fundición de Planchón Delgada (Etapa 1, Figura 2). La Estructura Modal se puede formar preferentemente al calentar las aleaciones de la presente descripción a temperaturas en el rango por encima de su punto de fusión y en un rango de 1100 °C a 2000 °C y enfriar por debajo de la temperatura de fusión de la aleación, que corresponde preferentemente a enfriamiento en el rango de  $1 \times 10^3$  a  $1 \times 10^{-3}$  K/s.

5 El laminado en caliente integrado de Planchón Gruesa (Figura 1) o la Fundición de Planchón Delgada (Etapa 2, Figura 2) de las aleaciones conducirá a la formación de la Estructura Modal Homogeneizada (Estructura #1a, Figura 8) a través del Refinamiento Dinámico de Nanofase (Mecanismo #0) en el planchón fundida con grosores típicos de 150 a 500 mm en un caso de Fundición de Planchón Gruesa y de 20 a 150 mm en un caso de Fundición de Planchón Delgada. El Tipo de Estructura Modal Homogeneizada (Tabla 1) dependerá de la química de la aleación y los parámetros de laminación en caliente.

10 El Mecanismo #1, que es el Refinamiento Estático de Nanofase con formación de Estructura Nanomodal (Estructura # 2), se produce cuando los planchones producidos con Estructura Modal Homogeneizada (Estructura #1a, Figura 8) se someten a una exposición a temperatura elevada (desde 700 °C hasta la temperatura fusión de la aleación) durante el procesamiento posterior. Los posibles métodos para la realización del Refinamiento Estático de Nanofase (Mecanismo #1) incluyen, entre otros, recocido en línea, recocido por lotes, laminación en caliente seguido de recocido hacia el grosor objetivo, etc. La laminación en caliente es un método típico usado para reducir el grosor del planchón a rangos de pocos milímetros para producir láminas de acero para diversas aplicaciones. La reducción de grosor típica puede variar ampliamente según el método de producción de la lámina inicial. El grosor inicial puede variar de 3 a 500 mm y el grosor final puede variar de 1 mm a 20 mm

20 La laminación en frío es un método ampliamente usado para la producción de láminas que se usa para lograr el grosor objetivo para aplicaciones particulares. Por ejemplo, la mayoría de las láminas de acero usadas para la industria automotriz tienen grosores en un rango de 0,4 a 4 mm. Para lograr el grosor deseado, se aplica laminación en frío a través de múltiples pasadas con recocido intermedio entre pasadas.

25 La reducción típica por pasada es del 5 al 70 % en dependencia de las propiedades del material. El número de pasadas antes del recocido intermedio también depende de las propiedades de los materiales y su nivel de endurecimiento por deformación en frío. La laminación en frío también se usa como etapa final para la calidad de la superficie, conocido como pasada de piel. Para las aleaciones de acero de la presente descripción y mediante métodos para formar la Estructura Nanomodal como se proporciona en la Figura 8, la laminación en frío desencadenará el Fortalecimiento Dinámico de Nanofase y la formación de la Estructura Nanomodal de Alta Resistencia.

### 30 Química de Aleación Preferida y Preparación de Muestras

35 La composición química de las aleaciones estudiadas se muestra en la Tabla 4 que proporciona las relaciones atómicas preferidas usadas. Los estudios iniciales se realizaron mediante fundición de placas en matriz de cobre.

40 Las aleaciones de las composiciones designadas se pesaron en cargas de 3 kilogramos mediante el uso de cantidades designadas de polvos ferroaditivos disponibles comercialmente de composición y contenido de impurezas conocidos, y elementos de aleación adicionales según fuera necesario, de acuerdo con las relaciones atómicas proporcionadas en la Tabla 4 para cada aleación. Las cargas de aleación se colocaron en crisoles a base de sílice revestidos con circonia y se cargaron en la máquina de fundición. La fusión tuvo lugar al vacío mediante el uso de una bobina de inducción de RF de 14 kHz. Las cargas se calentaron hasta que se fundieron completamente, con un período de tiempo entre 45 segundos y 60 segundos después del último punto en el que se observaron los constituyentes sólidos, para proporcionar sobrecalentamiento y asegurar la homogeneidad de la masa fundida.

45 A continuación, se vertieron las masas fundidas en una matriz de cobre enfriada con agua para formar planchones de fundición de laboratorio de aproximadamente 50 mm de grosor que está en el intervalo de grosor para el proceso de Fundición de Planchones Delgadas (Figura 2) y 75 mm x 100 mm de tamaño.

Tabla 4 Composición Química de las Aleaciones

	Fe	Cr	Ni	Mn	B	Si	Cu	C
<b>Aleación 63</b>	<b>75,53</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	<b>1,55</b>	<b>0,79</b>
<b>Aleación 64</b>	<b>73,99</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>6,67</b>	<b>1,55</b>	<b>0,79</b>
<b>Aleación 65</b>	<b>72,49</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>8,17</b>	<b>1,55</b>	<b>0,79</b>
<b>Aleación 66</b>	<b>74,74</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	<b>1,55</b>	<b>1,58</b>
<b>Aleación 67</b>	<b>73,20</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>6,67</b>	<b>1,55</b>	<b>1,58</b>
<b>Aleación 68</b>	<b>71,70</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>8,17</b>	<b>1,55</b>	<b>1,58</b>
<b>Aleación 69</b>	<b>76,43</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	<b>0,65</b>	<b>0,79</b>
<b>Aleación 70</b>	<b>75,75</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,86</b>	-	<b>5,13</b>	<b>0,65</b>	<b>0,79</b>
<b>Aleación 71</b>	<b>77,08</b>	<b>2,63</b>	<b>1,19</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	-	<b>0,79</b>
<b>Aleación 72</b>	<b>76,30</b>	<b>2,63</b>	<b>1,97</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	-	<b>0,79</b>
<b>Aleación 73</b>	<b>76,69</b>	<b>2,63</b>	<b>1,58</b>	<b>13,18</b>	-	<b>5,13</b>	-	<b>0,79</b>
<b>Aleación 74</b>	<b>76,11</b>	<b>2,63</b>	<b>1,58</b>	<b>13,76</b>	-	<b>5,13</b>	-	<b>0,79</b>

De lo anterior se puede ver que las aleaciones de la presente descripción que son susceptibles a las transformaciones ilustradas en la Figura 8 se clasifican en los siguientes grupos: (1) Fe/Cr/Ni/Mn/Si/Cu/C (aleaciones 63 a 70); (2) Fe/Cr/Ni/Mn/Si/C (aleaciones 71 a 74).

A partir de lo anterior, un experto en la técnica entendería que la composición de la aleación de la presente descripción incluye los siguientes cuatro elementos en el siguiente porcentaje atómico indicado: Fe (61,0 a 88,0 en. %); Si (0,5 a 9,0 en. %); Mn (0,9 a 19,0 en. %) y sin B. Además, se puede apreciar que los siguientes elementos son necesarios y están presentes en el porcentaje atómico indicado: Ni (0,1 a 9,0 en. %); Cr (0,1 a 19,0 en. %); C (0,1 a 4,0 en. %). Opcionalmente, el Cu puede estar presente de 0,1 a 4,0 en. %. Las impurezas que pueden estar presentes incluyen Al, Mo, Nb, S, O, N, P, W, Co, Sn, Zr, Ti, Pd y V, que pueden estar presentes hasta un 10 por ciento atómico.

Por consiguiente, las aleaciones en la presente descripción también pueden describirse más ampliamente como aleaciones basadas en Fe (más del 60,0 por ciento atómico) y que incluyen además Si y Mn. Las aleaciones pueden solidificarse a partir de la masa fundida para formar una Estructura Modal (Estructura #1, Figura 8), cuando tienen un grosor mayor o igual a 2,0 mm, o cuya Estructura Modal cuando se forma a una velocidad de enfriamiento inferior a o igual a 250 K/s, puede sufrir preferentemente un Refinamiento Dinámico de Nanofase que puede proporcionar una Estructura Modal Homogeneizada (Estructura #1a, Figura 8). Como se indica en la Figura 8, se puede entonces, a partir de dicha Estructura Modal Homogeneizada, formar finalmente una Estructura Nanomodal de Alta Resistencia (Estructura #3) con la morfología y propiedades mecánicas indicadas.

#### Ejemplo de Caso #1: Aleaciones Sin Boro

La composición química de las aleaciones sin boro de la presente descripción (Aleación 63 a Aleación 74) se enumera en la Tabla 4 que proporciona las relaciones atómicas preferidas usadas. Estas químicas se han usado para el procesamiento de materiales a través de la fundición de planchones en una máquina de fundición inclinable al vacío Indutherm VTC800V. Las aleaciones de las composiciones designadas se pesaron en cargas de 3 kilogramos mediante el uso de cantidades designadas de polvos ferroaditivos disponibles comercialmente de composición y contenido de impurezas conocidos, y elementos de aleación adicionales según fuera necesario, de acuerdo con las relaciones atómicas proporcionadas en la Tabla 4 para cada aleación. Las cargas de aleación pesadas se colocaron en crisoles a base de sílice revestidos de circonia y se cargaron en la máquina de fundición. La fusión tuvo lugar al vacío mediante el uso de una bobina de inducción de RF de 14 kHz. Las cargas se calentaron hasta que se fundieron completamente, con un período de tiempo entre 45 segundos y 60 segundos después del último punto en el que se observaron los constituyentes sólidos, con el fin de proporcionar sobrecalentamiento y asegurar la homogeneidad de la masa fundida. A continuación, se vertieron las masas fundidas en una matriz de cobre enfriada con agua para formar planchones fundidas de laboratorio de aproximadamente 50 mm de grosor, que se encuentra en el intervalo de grosor para el proceso de Fundición de Planchones Delgadas y de 75 mm x 100 mm de tamaño.

El análisis térmico de las aleaciones de la presente descripción se realizó en las muestras de planchones fundidas como solidificadas en un Calorímetro de Barrido Diferencial (DSC) Netzsch Pegasus 404. Los perfiles de medición consistieron en una rampa rápida hasta 900 °C, seguida de una rampa controlada a 1425 °C a una velocidad de 10 °C/minuto, un enfriamiento controlado de 1425 °C a 900 °C a una velocidad de 10 °C/min, y un segundo calentamiento a 1425 °C a una velocidad de 10 °C/min. Se tomaron medidas de solidus, liquidus y temperaturas pico desde la etapa de calentamiento final, para asegurar una medida representativa del material en un estado de

equilibrio con el mejor contacto de medida posible. En las aleaciones enumeradas en la Tabla 5, la fusión se produce en una etapa excepto en la Aleación 65 con la fusión en dos etapas. Fusión inicial registrada desde el mínimo en ~1278 °C y depende de la química de la aleación. Temperatura de fusión final máxima registrada a 1450 °C.

5 **Tabla 5 Datos de Análisis Térmico Diferencial Para Comportamiento de Fusión**

Aleación	Solidus (°C)	Liquidus 2 (°C)	Pico 1 (°C)	Pico 2 (°C)	Pico 3 (°C)	Pico 4 (°C)
Aleación 63	1377	1433	1426	-	-	-
Aleación 64	1365	1422	1404	-	-	-
Aleación 65	1341	1408	1369	1402	-	-
Aleación 66	1353	1421	1413	-	-	-
Aleación 67	1353	1407	1400	-	-	-
Aleación 68	1278	1389	1384	-	-	-
Aleación 69	1387	1449	1444	-	-	-
Aleación 70	1378	1434	1429	-	-	-
Aleación 71	1395	1444	1439	-	-	-
Aleación 72	1395	1450	1446	-	-	-
Aleación 73	1386	1442	1437	-	-	-
Aleación 74	1392	1448	1445	-	-	-

El planchón de laboratorio de 50 mm de grosor de cada aleación se sometió a laminación en caliente a la temperatura de 1250 °C, excepto la de la Aleación 68, que se laminó a 1250 °C. La laminación se realizó en un tren de laminación de una etapa Fenn Modelo 061, que emplea un horno de túnel Lucifer EHS3GT-B18 en línea. El material se mantuvo a la temperatura de laminación en caliente durante un tiempo de permanencia inicial de 40 minutos para asegurar una temperatura homogénea. Después de cada pasada en el tren de laminación, la muestra se devolvió al horno de túnel con una retención de recuperación de temperatura de 4 minutos para corregir la pérdida de temperatura durante la pasada de laminación en caliente. La laminación en caliente se llevó a cabo en dos campañas, y la primera campaña logró una reducción total de aproximadamente el 80 % al 88 % hasta un grosor de entre 6 mm y 9,5 mm. Tras la primera campaña de laminación en caliente, se cortó una sección de lámina de entre 130 mm y 200 mm de longitud del centro del material laminado en caliente. Esta sección de corte se usó luego para una segunda campaña de laminación en caliente para una reducción total entre ambas campañas de entre el 96 % y el 97 %. En la Tabla 6 se encuentra disponible una lista de parámetros específicos de laminación en caliente usados para todas las aleaciones.

Tabla 6 Parámetros de Laminación en Caliente

Aleación	Temperatura (°C)	Campaña	# Pasadas	Grosor inicial (mm)	Grosor final (mm)	Reducción de campaña (%)	Reducción acumulada (%)
Aleación 63	1250	1	6	49,30	9,15	81,5	81,5
		2	3	9,15	1,69	81,5	96,6
Aleación 64	1250	1	6	48,82	9,19	81,2	81,2
		2	3	9,19	1,83	80,1	96,3
Aleación 65	1250	1	6	49,07	8,90	81,9	81,9
		2	3	8,90	1,82	79,6	96,3
Aleación 66	1250	1	6	48,79	9,02	81,5	81,5
		2	3	9,02	1,71	81,1	96,5
Aleación 67	1250	1	6	48,86	9,22	81,1	81,1
		2	3	9,22	1,75	81,0	96,4
Aleación 68	1200	1	6	48,91	9,45	80,7	80,7
		2	3	9,45	1,96	79,2	96,0
Aleación 69	1250	1	6	48,50	9,04	81,4	81,4
		2	3	9,04	1,77	80,4	96,3
Aleación 70	1250	1	6	48,60	9,27	80,9	80,9
		2	3	9,27	1,73	81,4	96,5
Aleación 71	1250	1	6	48,90	9,14	81,3	81,3
		2	3	9,14	1,76	80,8	96,4
Aleación 72	1250	1	6	48,67	9,23	81,0	81,0
		2	3	9,23	1,83	80,2	96,2
Aleación 73	1250	1	6	48,90	9,23	81,1	81,1
		2	3	9,23	1,87	79,8	96,2
Aleación 74	1250	1	6	48,64	9,32	80,8	80,8
		2	3	9,32	1,93	79,3	96,0

La densidad de las aleaciones se midió en secciones de material fundido que se habían laminado en caliente entre 6 mm y 9,5 mm. Las secciones se cortaron a dimensiones de 25 mm x 25 mm, y luego se rectificó la superficie para eliminar el óxido del proceso de laminación en caliente. Las mediciones de la densidad aparente se tomaron de estas muestras molidas, mediante el uso del método de Arquímedes en una balanza especialmente construida que permite pesar tanto en aire como en agua destilada. La densidad de cada aleación se tabula en la Tabla 7 y se encontró que varían de 7,64 a 7,80 g/cm<sup>3</sup>. Los resultados experimentales han revelado que la precisión de esta técnica es ± 0,01 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 7 Densidades Medias de las Aleaciones**

Aleación	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Aleación 63	7,78
Aleación 64	7,72
Aleación 65	7,66
Aleación 66	7,76
Aleación 67	7,70
Aleación 68	7,64
Aleación 69	7,79
Aleación 70	7,78
Aleación 71	7,80
Aleación 72	7,80
Aleación 73	7,80
Aleación 74	7,79

A continuación, la lámina completamente laminada en caliente se sometió a laminación en frío en múltiples pasadas. La laminación se realizó en un tren de laminación de una sola etapa Fenn Modelo 061. En la Tabla 8 se muestra una lista de parámetros específicos de laminación en frío usados para las aleaciones.

**Tabla 8 Parámetros de Laminación en Frío**

Aleación	# Pasadas	Grosor Inicial (mm)	Grosor Final (mm)	Reducción (%)
Aleación 63	4	1,76	1,18	33,1
Aleación 64	5	1,82	1,18	35,1
Aleación 65	7	1,87	1,20	35,8
Aleación 66	4	1,71	1,15	32,7
Aleación 67	5	1,78	1,17	33,9
Aleación 68	11	2,03	1,21	40,5
Aleación 69	5	1,78	1,20	32,3
Aleación 70	4	1,74	1,21	30,6
Aleación 71	9	1,80	1,20	33,2
Aleación 72	10	1,84	1,20	34,7
Aleación 73	10	1,87	1,21	35,2
Aleación 74	13	1,95	1,22	37,5

Después de la laminación en caliente y en frío, las probetas de tracción se cortaron mediante EDM. Las muestras resultantes se trataron térmicamente con los parámetros especificados en la Tabla 9. Los tratamientos térmicos con hidrógeno se realizaron en un horno de atmósfera sellada CAMCo G1200-ATM. Las muestras se cargaron a

temperatura ambiente y se calentaron hasta la temperatura de permanencia objetivo a 1200 °C/hora. Las estancias se llevaron a cabo en las atmósferas enumeradas en la Tabla 9. Las muestras se enfriaron bajo control de horno en una atmósfera de argón. Los tratamientos térmicos sin hidrógeno se realizaron en un horno de caja sellada Lucifer 7GT-K12 bajo una purga de gas argón, o en un horno de tubo ThermCraft XSL-3-0-24-1C. En el caso del enfriamiento por aire, las muestras se mantuvieron a la temperatura objetivo durante un período de tiempo objetivo, se sacaron del horno y se enfriaron al aire. En los casos de enfriamiento controlado, la temperatura del horno se redujo a una velocidad específica con las muestras cargadas.

**Tabla 9 Parámetros de Tratamiento Térmico**

Tratamiento Térmico	Temperatura del Horno [°C]	Tiempo de Permanencia [min]	Atmósfera	Enfriamiento
HT1	850	360	Flujo de Argón	0,75 °C/min a <500 °C luego aire
HT11	850	5	Flujo de Argón	Aire Normalizado
HT12	850	360	25 % H2/75 % Ar	45 °C/hora
HT13	950	360	25 % H2/75 % Ar	Control de horno rápido
HT14	1200	120	25 % H2/75 % Ar	Control de Horno Rápido

Los ejemplares de tracción se ensayaron en condiciones de laminación en caliente, laminación en frío y tratado térmicamente. Las propiedades a tracción se midieron en un marco de pruebas mecánicas Instron (Modelo 3369), mediante el uso del software de análisis y control Bluehill de Instron. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente en control de desplazamiento con el accesorio inferior que se mantiene rígido y el accesorio superior que se mueve; la celda de carga está unida al accesorio superior.

Las propiedades a tracción de las aleaciones en la condición de laminación en caliente se enumeran en la Tabla 10. Los valores de la resistencia máxima a la tracción pueden variar de 947 a 1329 MPa con un alargamiento por tracción de 20,5 a 55,4 %. El límite de elasticidad está en un rango de 267 a 520 MPa. Los valores de las características mecánicas de las aleaciones de acero de la presente descripción dependerán de la química de la aleación y de las condiciones de laminación en caliente. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de curva de tensión-deformación para la Aleación 63 en estado de laminación en caliente que demuestra el comportamiento típico de Clase 2 (Figura 7).

**Tabla 10 Propiedades a Tracción de las Aleaciones Después de la Laminación en Caliente**

Aleación	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
Aleación 63	329	1184	53,3
	314	1195	49,8
	330	1191	49,0
Aleación 64	314	1211	52,4
	344	1210	55,4
	353	1205	54,1
Aleación 65	366	1228	42,8
	355	1235	49,1
	334	1207	50,4
Aleación 66	469	981	39,5
	429	960	35,1
	465	967	39,8
Aleación 67	414	947	29,0
	439	970	30,6
	416	965	30,2
Aleación 68	475	1107	39,3
	487	1114	43,8
	520	1099	40,9
Aleación 69	284	1293	48,3
	278	1301	43,7
	267	1287	49,8
Aleación 70	307	1248	53,4
	294	1248	51,4
	310	1253	49,2
Aleación 71	298	1297	37,5
	278	1320	35,3
	297	1310	38,5
Aleación 72	296	1291	43,6
	292	1311	46,1
	329	1329	48,1
Aleación 73	303	1301	38,7
	296	1255	34,9
	278	1266	34,2
Aleación 74	281	1280	43,3
	273	990	20,5

Las propiedades a tracción de las aleaciones seleccionadas después de la laminación en caliente y la posterior laminación en frío se enumeran en la Tabla 11, que representa la Estructura #3 o la Estructura Nanomodal de Alta Resistencia. Los valores de resistencia máxima a la tracción pueden variar de 1402 a 1766 MPa con un alargamiento por tracción de 9,7 a 29,1 %. El límite de elasticidad está en un rango de 913 a 1278 MPa. Los valores de las características mecánicas en las aleaciones de acero de la presente descripción dependerán de la química de la aleación y las condiciones de procesamiento.

Tabla 11 Propiedades a Tracción de las Aleaciones Seleccionadas Después de la Laminación en Frío

Aleación	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
Aleación 63	975	1587	25,3
	1043	1570	23,8
	1044	1559	22,5
Aleación 64	1109	1630	21,4
Aleación 65	1135	1686	22,1
	1159	1681	21,9
Aleación 66	1048	1409	26,4
	1031	1402	18,5
	1093	1416	29,1
Aleación 67	1048	1541	26,7
	1107	1531	23,2
	1119	1508	16,7
Aleación 68	1278	1645	16,2
	1204	1665	17,9
Aleación 70	1033	1572	18,8
	913	1579	21,3
Aleación 71	954	1672	18,1
	967	1669	19,5
	1045	1647	11,7
Aleación 72	1128	1734	11,2
	1137	1751	18,5
	1202	1763	17,9
Aleación 73	1031	1718	18,1
	1088	1695	15,7
	1070	1715	19,7
Aleación 69	1124	1712	9,7
	1115	1735	11,5
	1155	1766	19,4
Aleación 74	1140	1693	13,3
	1156	1712	18,4
	1120	1725	18,5

Las propiedades a tracción de las láminas laminadas en caliente después de la laminación en caliente con el tratamiento térmico posterior a diferentes parámetros (Tabla 9) se enumeran en la Tabla 12. Los valores de la resistencia máxima a la tracción pueden variar de 669 a 1352 MPa con un alargamiento a la tracción del 15,9 % al 78,1 %. El límite de elasticidad está en un rango de 217 a 621 MPa. Los valores de las características mecánicas en las aleaciones de acero de la presente descripción dependerán de la química de la aleación y las condiciones de procesamiento.

Tabla 12 Propiedades a Tracción de las Aleaciones con Laminación en Caliente y Tratamiento Térmico posterior

	Aleación	Tratamiento Térmico 1	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
5	Aleación 63	HT14	223	1083	42,1
			217	1104	47,2
10			220	1100	49,5
		HT1	393	1180	53,8
			391	1186	45,9
15			398	1160	51,3
		HT12	385	979	27,2
			383	1091	33,0
20			383	1104	36,1
		HT13	333	1169	51,9
			341	1175	51,6
			342	1164	51,3
25		HT11	459	1227	51,3
			470	1198	58,0
			489	1220	48,5
30	Aleación 64	HT14	217	1091	46,6
			221	1107	48,1
			224	1116	51,3
35		HT1	426	1227	44,7
			457	1226	45,5
		HT12	415	1150	36,7
40			414	1130	35,3
			418	1147	35,1
		HT13	350	1195	52,3
45			361	1163	56,3
			362	1174	52,3
		HT11	489	1248	54,2
	505		1251	52,7	
50	487		1255	56,1	
	Aleación 65	HT14	228	1072	34,7
			226	1047	32,3
			239	1135	47,8
55		HT1	459	944	22,7
			453	925	22,0
			456	984	24,3
		HT12	447	1097	31,2
60			432	1024	27,9
			448	1174	40,3
	HT13	335	1187	60,5	
65		348	1171	56,5	
		337	1187	54,2	

ES 2 864 636 T3

(continuación)

	Aleación	Tratamiento Térmico 1	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
5		HT11	502	1284	54,0
	506		1247	54,3	
	505		1254	55,2	
10	Aleación 66	HT14	280	823	34,3
			282	838	33,2
			282	850	37,8
15		HT12	413	1059	47,6
			409	1042	44,3
			414	989	39,8
20		HT13	366	1110	78,1
			365	1112	63,5
			364	1107	73,5
25		HT11	501	1104	71,0
			487	1104	68,8
			469	1091	75,7
30	Aleación 67	HT14	294	801	28,0
			298	825	32,0
			294	832	33,1
35		HT12	452	1051	34,6
			457	1082	35,6
			466	998	30,5
40		HT13	410	1230	59,3
			401	1113	42,6
			402	1119	42,7
45		HT11	540	1170	48,2
			524	1178	59,0
			546	1216	70,3
50	Aleación 68	HT14	307	778	27,2
			315	745	28,6
			298	669	22,5
			515	904	20,3
		HT12	489	1113	33,2
			497	1070	28,6
			418	1145	43,7
55		HT13	431	1069	38,3
			427	1089	38,8
			617	1280	53,2
60		HT11	621	1287	52,4
			385	1166	31,5
65	HT12	387	1222	37,4	
		374	1133	27,5	

ES 2 864 636 T3

(continuación)

Aleación	Tratamiento Térmico 1	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
Aleación 69	HT13	290	1198	46,3
		307	1240	44,4
		303	1215	42,7
	HT11	458	1260	53,2
		468	1327	46,9
		446	1242	49,6
	HT13	330	1170	43,4
		319	1189	51,8
		324	1192	52,1
	HT11	443	1212	51,1
		458	1231	57,9
		422	1200	51,9
Aleación 71	HT12	361	963	17,3
		367	992	18,2
		357	931	15,9
	HT13	316	1228	34,7
		413	1232	28,1
		328	1287	40,8
	HT11	448	1349	48,5
		444	1338	48,0
		451	1348	47,3
Aleación 72	HT12	401	1073	23,6
		361	1089	25,1
		368	1082	25,1
		307	1255	43,4
	HT13	320	1257	51,3
		319	1234	45,3
		491	1336	50,6
	HT11	483	1312	53,7
		495	1352	48,2
		248	1226	40,4
Aleación 73	HT14	246	1235	42,4
		242	1190	39,8
		369	1152	25,9
	HT12	378	1120	25,4
		427	1237	30,6
		320	1281	46,5
	HT13	324	1281	48,5
		329	1308	45,1
		485	1312	42,5

(continuación)

Aleación	Tratamiento Térmico 1	Esfuerzo de Rendimiento (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento a la Tracción (%)
	HT11	485	1328	42,5
		472	1346	47,1
Aleación 74	HT12	432	1153	29,8
		444	1264	49,0
		430	1229	35,4
	HT13	324	1210	57,4
		329	1256	46,2
		326	1204	53,9
HT11	523	1244	40,5	
	538	1288	58,5	
	511	1263	52,4	

Este Ejemplo de Caso demuestra que los mecanismos en las aleaciones libres de boro siguen la ruta ilustrada en la Figura 8 sin formación de boruros que proporcionan una alta resistencia con combinaciones de propiedades de alta ductilidad.

Ejemplo de Caso 2: Desarrollo Estructural en una Aleación sin Boro

Se fundió una placa con un grosor de 50 mm de la Aleación 65 en una máquina de fundición inclinable al vacío Indutherm VTC800V. La Aleación de composición designada se pesó en cargas de 3 kilogramos mediante el uso de cantidades designadas de polvos ferroaditivos disponibles comercialmente de composición y contenido de impurezas conocidos, y elementos de aleación adicionales según sea necesario, de acuerdo con las relaciones atómicas proporcionadas en la Tabla 4. La carga de Aleación pesada se colocó en crisoles a base de sílice revestidos con circonia y se cargó en la máquina de fundición. La fusión tuvo lugar al vacío mediante el uso de una bobina de inducción de RF de 14 kHz. La carga de aleación se calentó hasta que estuvo completamente fundida, con un período de tiempo entre 45 segundos y 60 segundos después del último punto en el que se observaron los constituyentes sólidos, para proporcionar sobrecalentamiento y asegurar la homogeneidad de la masa fundida. Luego se vertió la masa fundida en una matriz de cobre enfriada por agua para formar un planchón de laboratorio de aproximadamente 50 mm de grosor que tiene el rango de grosor para el Proceso de Fundición de Planchón Delgada y 75 mm x 100 mm de tamaño.

El planchón de laboratorio de 50 mm de grosor de la Aleación 65 se sometió a laminación en caliente a la temperatura de 1250 °C con una reducción total del 97 %. A continuación, la lámina completamente laminada en caliente se sometió a laminación en frío en múltiples pasadas hasta un grosor de 1,2 mm. La lámina laminada en frío se trató térmicamente a 850 °C durante 5 minutos que imita el recocido en línea en la producción comercial de láminas. Para hacer las muestras SEM, las secciones transversales de la muestra de lámina en estado fundido, después de la laminación en caliente y después de la laminación en frío con el posterior tratamiento térmico se cortaron y molieron con papel SiC y luego se pulieron progresivamente con pasta de medio de diamante de hasta 1 mm de grano. El pulido final se realizó con 0,02 mm de grano de solución de SiO<sub>2</sub>. Las microestructuras de las muestras de la Aleación 65 se examinaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido EVO-MA10 fabricado por Carl Zeiss SMT Inc.

La Figura 10 muestra imágenes SEM de la microestructura en la Aleación 65 en estado fundido, después de la laminación en caliente y después de la laminación en frío con el tratamiento térmico posterior que demuestran un desarrollo estructural de la Estructura Modal en estado fundido (Figura 10a), Estructura Nanomodal en estado de laminación en caliente (Figura 10b), y Estructura Nanomodal de Alta Resistencia después de la laminación en frío (Figura 10c).

Este Ejemplo de Caso demuestra que el desarrollo estructural en aleaciones sin boro es similar al de las aleaciones que contienen boro (Figura 8), aunque el tamaño de los granos de la matriz puede ser mayor en ausencia de fases de anclaje de boro.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método que comprende:
  - 5 a. suministrar una aleación de metal que consiste en Fe a un nivel de 61,0 a 88,0 por ciento atómico, Si a un nivel de 0,5 a 9,0 por ciento atómico, Mn a un nivel de 0,90 a 19,0 por ciento atómico, Ni a un nivel de 0,1 a 9,0 por ciento atómico, Cr a un nivel de 0,1 a 19,0 por ciento atómico, C a un nivel de 0,1 a 4,0 por ciento atómico, opcionalmente Cu a un nivel de 0,1 a 4,0 por ciento atómico e impurezas, en donde dicha aleación de metal está libre de boro;
  - 10 b. fundir dicha aleación de metal y enfriar y solidificar y formar una aleación solidificada que tenga un grosor mayor o igual a 20 mm y hasta 500 mm y un límite de elasticidad de 300 MPa a 600 MPa, en donde dicha aleación solidificada tiene un punto de fusión ( $T_m$ )
  - 15 c. calentar dicha aleación solidificada a una temperatura de 700 °C por debajo de dicha aleación  $T_m$  y reducir dicho grosor de dicha aleación solidificada a una velocidad de deformación de  $10^{-6}$  a  $10^4$  s<sup>-1</sup> para proporcionar una primera aleación resultante que tenga un límite de elasticidad de 200 MPa hasta 1000 MPa; y
  - 20 d. tensar la primera aleación resultante por encima de dicho límite de elasticidad para proporcionar una segunda aleación resultante que tiene un grosor de 0,1 mm a 25,0 mm, en donde la segunda aleación resultante tiene una resistencia a la tracción de 400 MPa a 1825 MPa y un alargamiento de 2,4 a 78,1 %.
2. El método de la reivindicación 1, en donde el calentamiento de dicha aleación solidificada en la etapa (c) se realiza a una temperatura de 700 °C a 1200 °C.
3. El método de la reivindicación 2, en donde dicha primera aleación resultante tiene:
  - 25 a. granos de 50 nm a 50000 nm; y
  - b. granos de precipitación de 1 nm a 200 nm.
4. El método de la reivindicación 1, en donde dicha aleación solidificada en la etapa (c) se trata térmicamente de manera repetida a dicha temperatura de 700 °C por debajo de dicha aleación  $T_m$  y el grosor de dicha aleación solidificada se reduce durante cada uno de dichos tratamientos térmicos.
5. El método de la reivindicación 1, en donde dicha segunda aleación resultante tiene uno o más de los siguientes:
  - 35 a. granos de 25 nm a 25 000 nm;
  - b. granos de precipitación de 1 nm a 200 nm.
6. El método de la reivindicación 3 en donde dicha segunda aleación resultante se coloca en un vehículo.
7. El método de la reivindicación 5, en donde dicha segunda aleación resultante se coloca en un vehículo.
8. Un collar de perforación, tubería de perforación, revestimiento de tubería, junta de herramienta, cabezal de pozo, tanque de almacenamiento de gas comprimido o recipiente de gas natural licuado que comprende la segunda aleación resultante producida por el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 y 5.

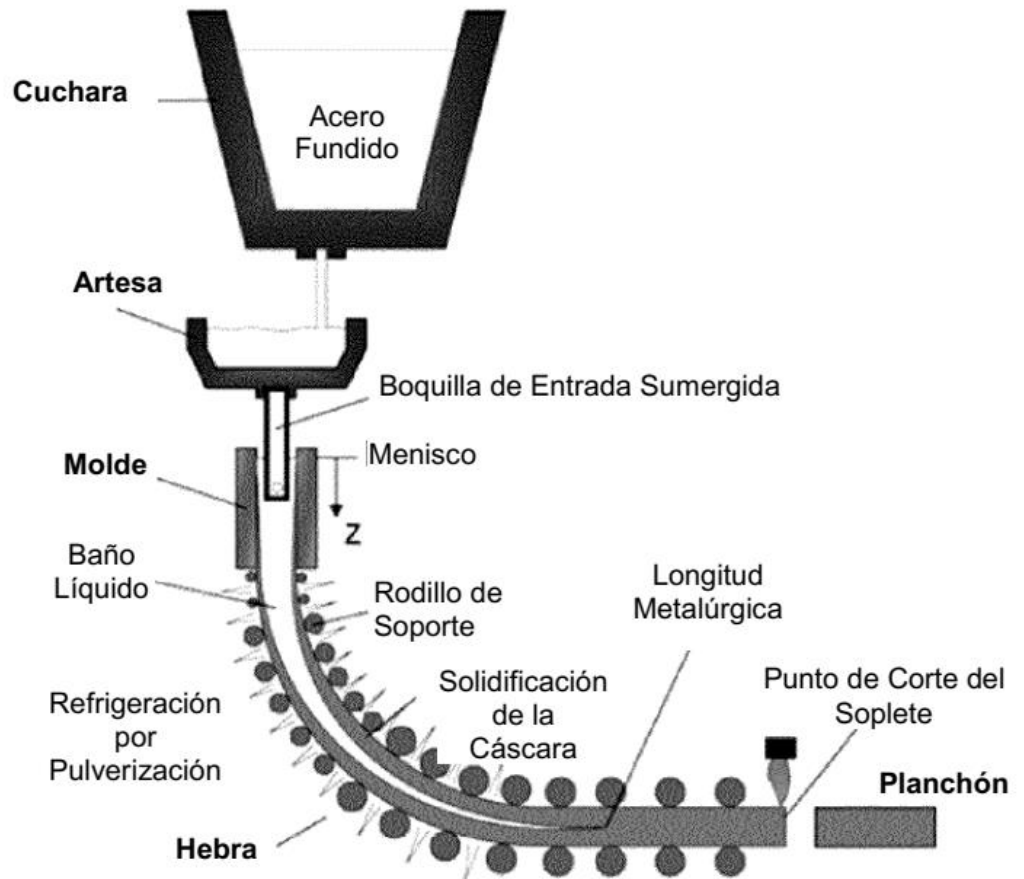


Figura 1 Diagrama de flujo del proceso de fundición continua de planchones.

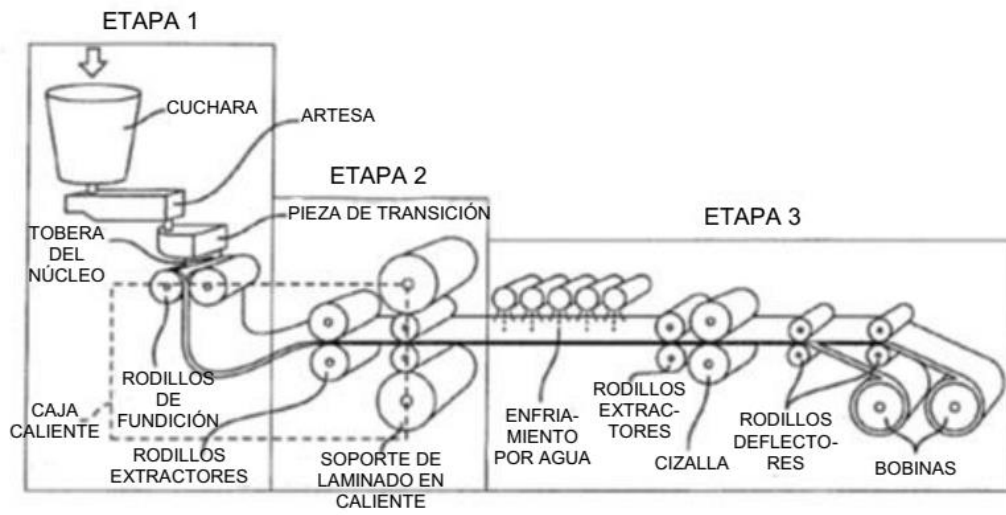


Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de fundición de planchones delgados que muestra las etapas de producción de la lámina de acero. Tener en cuenta que el proceso se puede dividir en 3 etapas como se muestra.

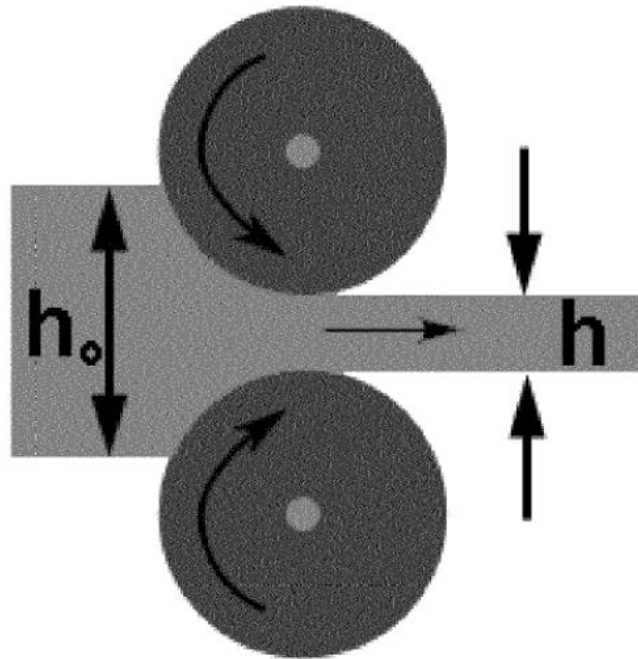


Figura 3 Ilustración esquemática de un proceso de laminación en caliente (en frío) donde  $h_0$  es el grosor inicial de la lámina y  $h$  es el grosor final de la lámina después de la pasada de laminación.

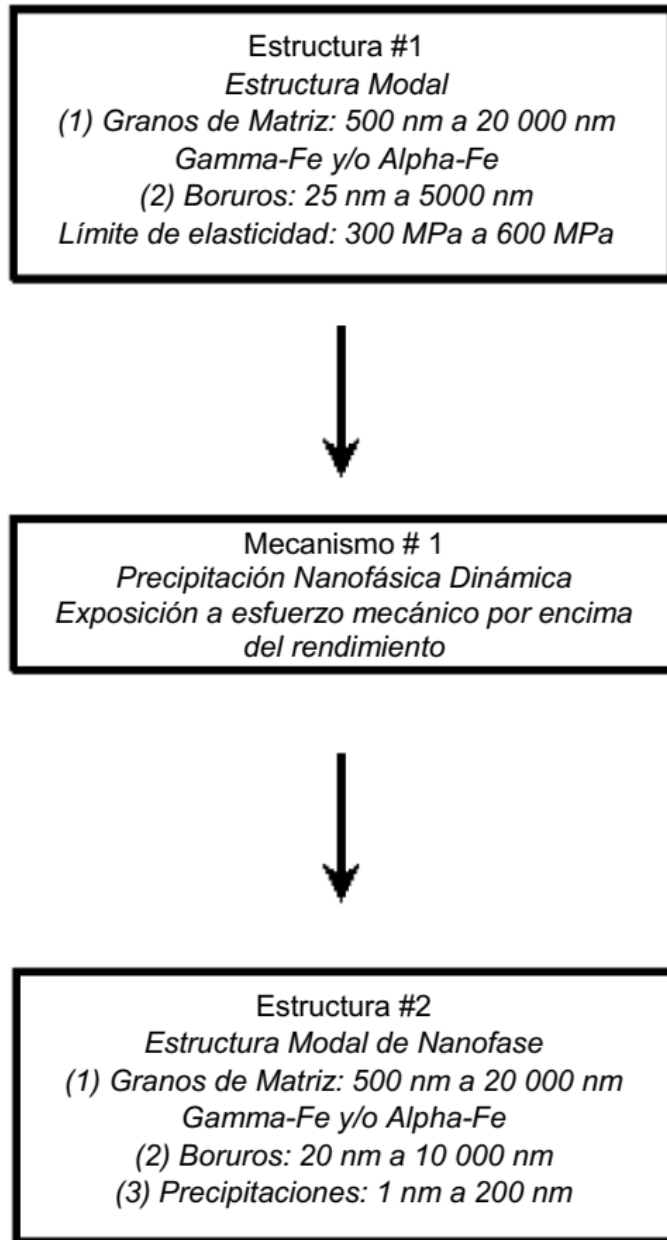


FIGURA 4

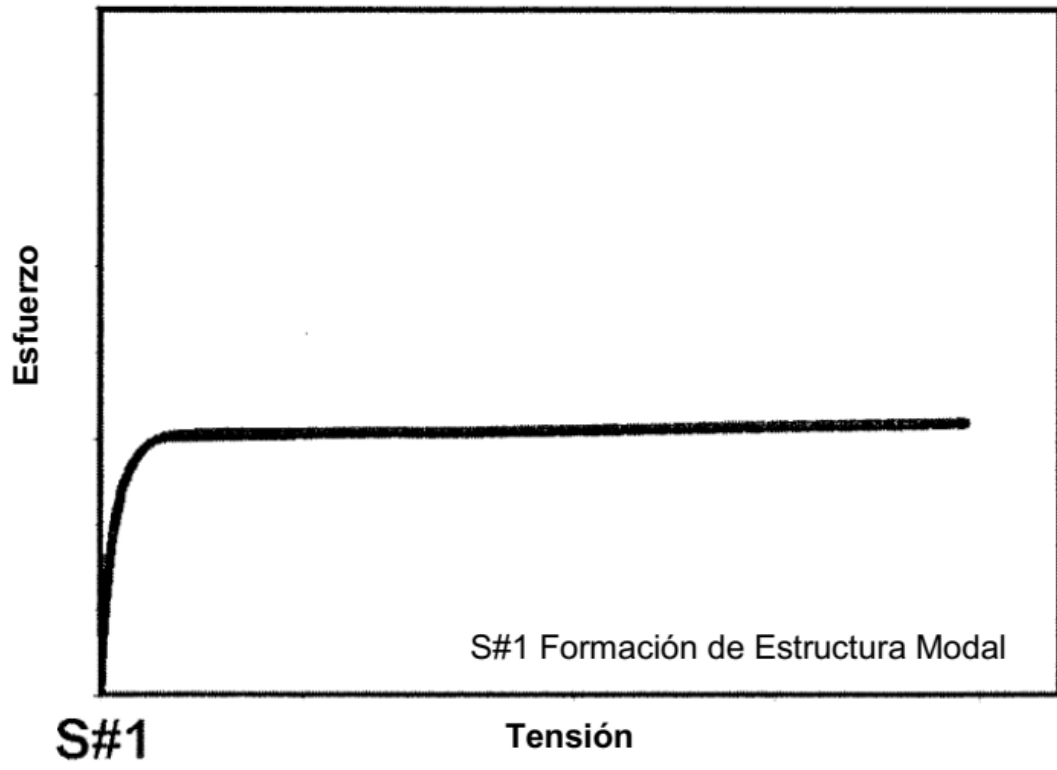


Figura 5

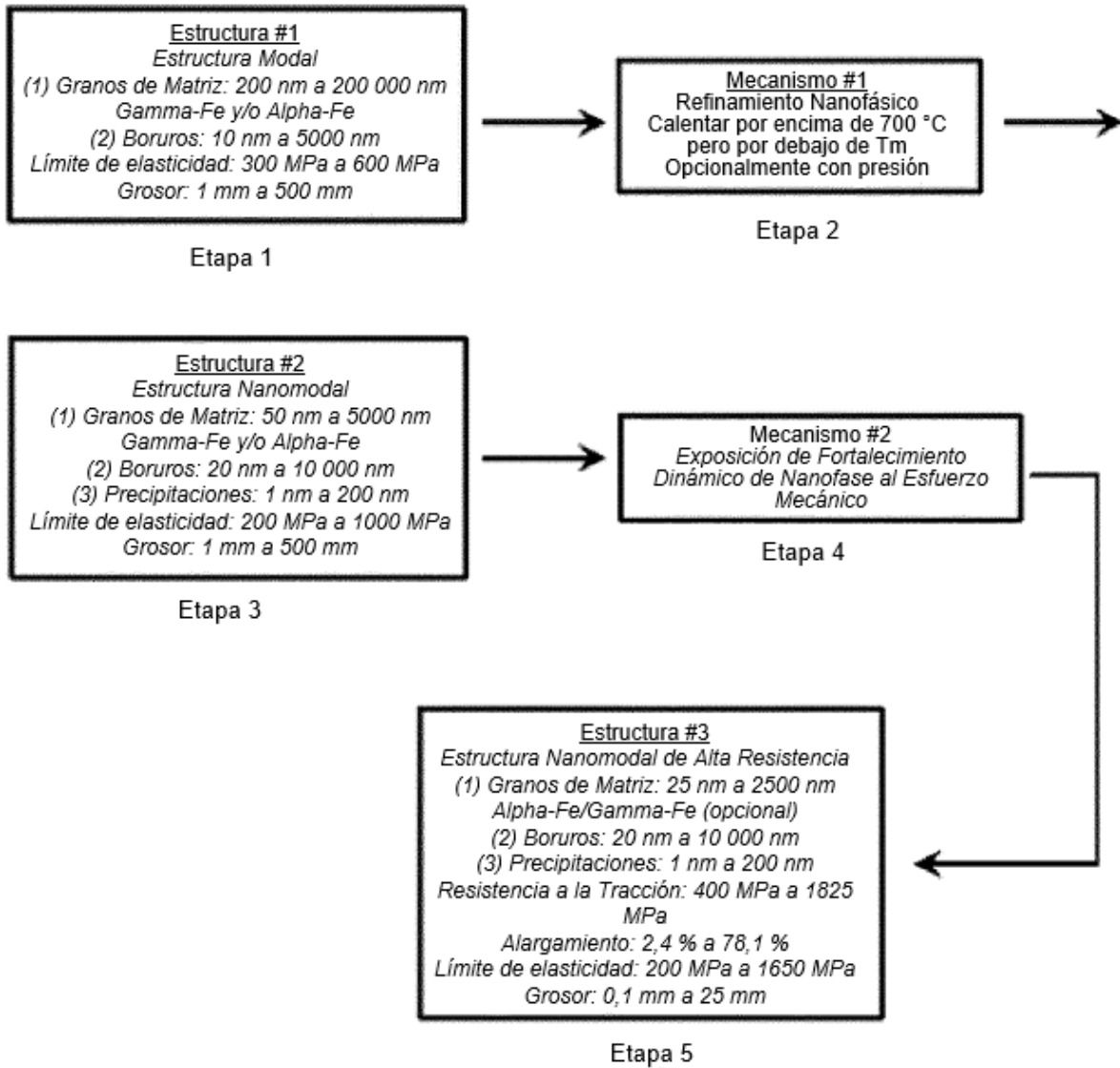


Figura 6

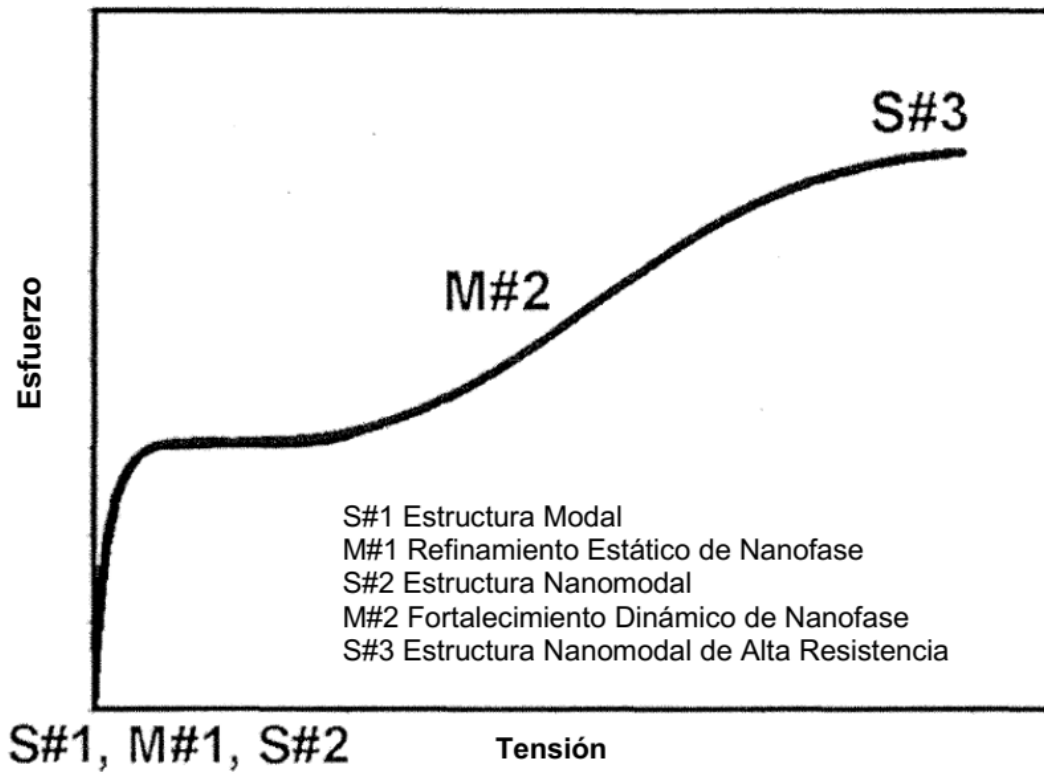


Figura 7

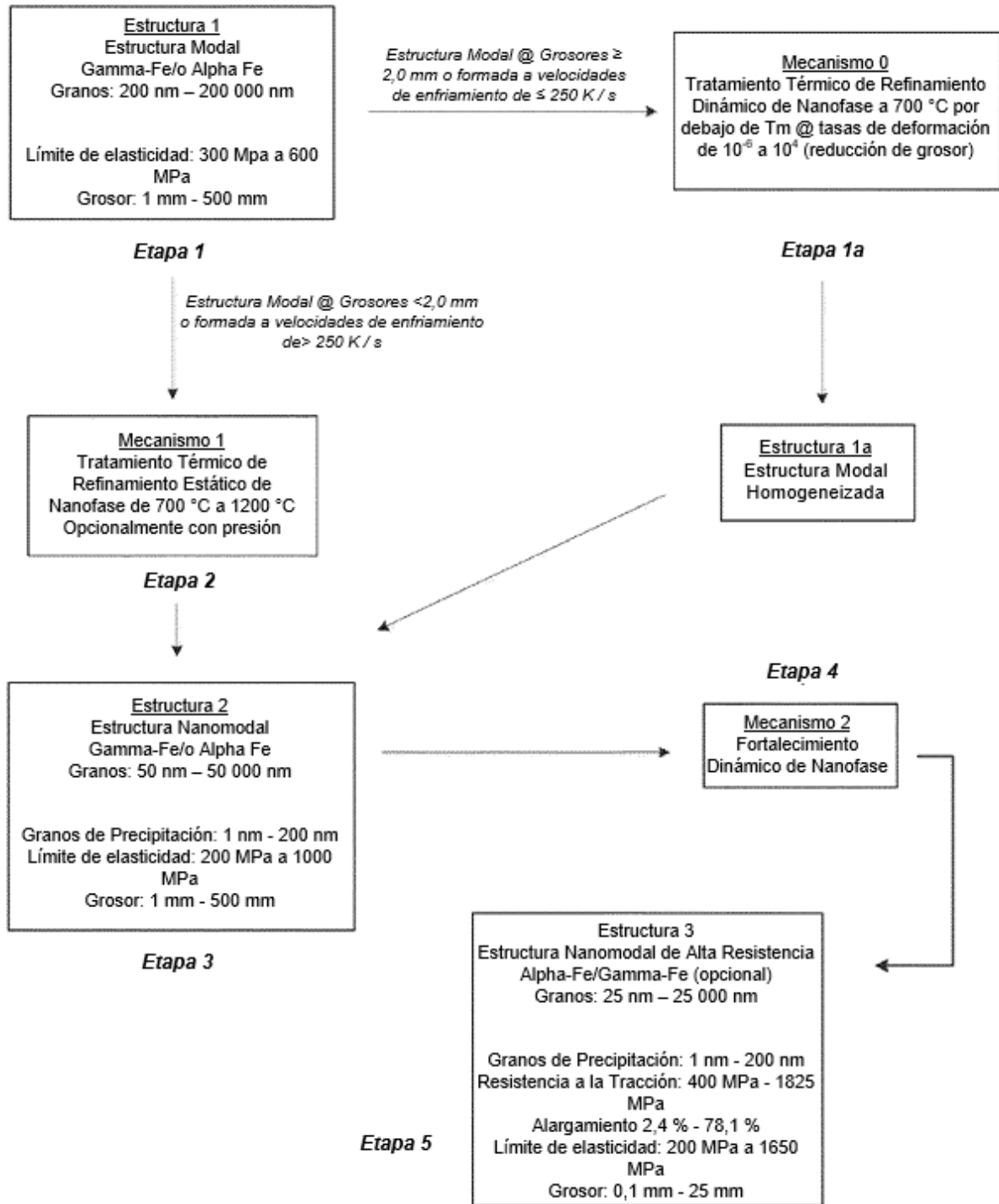


Figura 8

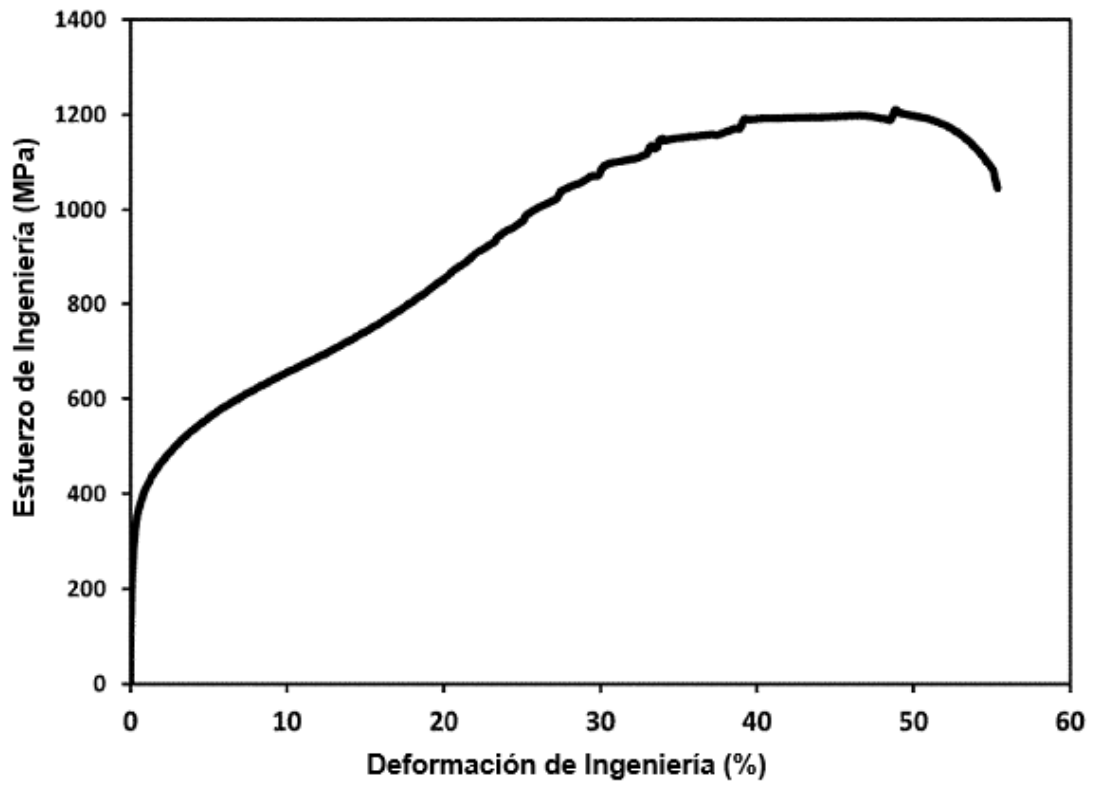


Figura 9 Un ejemplo de curva de tensión-deformación de la Aleación 63 sin boro en estado de laminación en caliente.

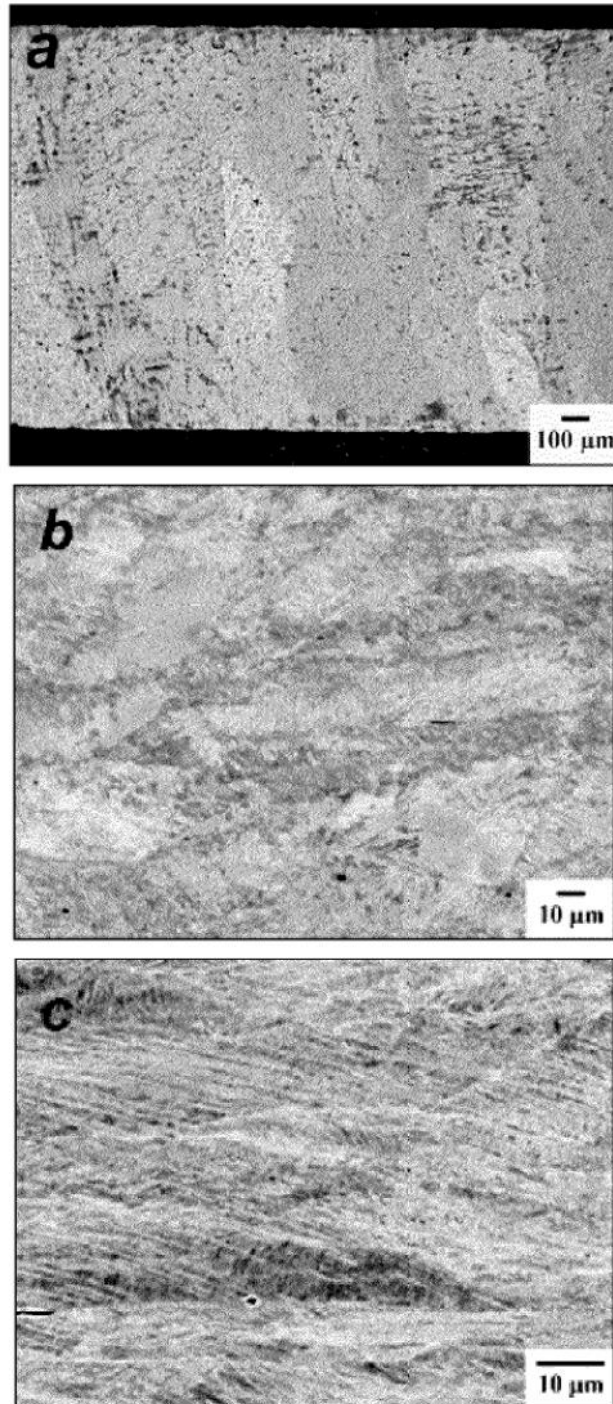


Figura 10 Imágenes de electrones retrodispersados de la microestructura en la Aleación 65 fundida a 50 mm de grosor: (a) como fundida; (b) después de la laminación en caliente a 1250 °C; (c) después de la laminación en frío hasta un grosor de 1,2 mm.