

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 933 436**

51 Int. Cl.:

**C22C 38/40** (2006.01)

**C22C 38/00** (2006.01)

**C22C 38/02** (2006.01)

**C22C 38/58** (2006.01)

**C22C 45/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.07.2017 PCT/US2017/041027**

87 Fecha y número de publicación internacional: **11.01.2018 WO18009750**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.07.2017 E 17824946 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.09.2022 EP 3481972**

54 Título: **Método para producir acero de alto límite elástico**

30 Prioridad:

**08.07.2016 US 201662359844 P**

**07.04.2017 US 201762482954 P**

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

**08.02.2023**

73 Titular/es:

**UNITED STATES STEEL CORPORATION (100.0%)**

**600 Grant Street**

**Pittsburgh, PA 15219, US**

72 Inventor/es:

**BRANAGAN, DANIEL JAMES;**

**FRERICHS, ANDREW E.;**

**MEACHAM, BRIAN E.;**

**BALL, ANDREW T.;**

**JUSTICE, GRANT G.;**

**CLARK, KURTIS R.;**

**CHENG, SHENG;**

**ANDERSON, SCOTT T.;**

**LARISH, SCOTT T.;**

**GIDDENS, TAYLOR L.;**

**TEW, LOGAN J.;**

**SERGUEEVA, ALLA V. y**

**WALLESER, JASON K.**

74 Agente/Representante:

**GARCÍA GONZÁLEZ, Sergio**

ES 2 933 436 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

Método para producir acero de alto límite elástico

Campo de invención

5 Esta divulgación se relaciona con el acero de alto límite elástico. Debido a las estructuras y mecanismos únicos, el límite elástico se puede aumentar sin afectar significativamente la resistencia última a tracción (UTS) y en algunos casos, se puede obtener un mayor límite elástico sin una disminución significativa en la resistencia última a tracción y alargamiento total. Estos nuevos aceros pueden ofrecer ventajas para una miríada de aplicaciones donde es deseable un límite elástico relativamente alto junto con una UTS relativamente alta y un alargamiento total tal como la jaula de pasajeros en los automóviles.

10 Antecedentes

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) de tercera generación están siendo actualmente desarrollados para usos en automóviles, y en particular en aplicaciones de carrocerías de automóviles. Los aceros de alta resistencia (AHSS) se clasifican por resistencias a tracción superiores a 700 MPa con alargamientos de 4 % a 30 % e incluyen tales tipos como aceros martensíticos (MS), aceros de fase dual (DP), aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP), y aceros de fase compleja (CP). Objetivos de ejemplo para AHSS de 3ra generación se proporcionan en el gráfico en banana para aceros para carrocerías que se publica por *World Auto Steel* (figura 1).

20 Las propiedades de tracción tales como resistencia última a tracción (UTS) y alargamiento total son puntos de referencia importantes para establecer combinaciones de propiedades. Sin embargo, los materiales de AHSS generalmente no se clasifican por el límite elástico (YS). El límite elástico de un material también es de gran importancia para los diseñadores de automóviles dado que una vez que una parte está en servicio y si la parte se es estresada más allá del límite elástico, la parte se deformará permanentemente (plásticamente). Los materiales que tienen un alto límite elástico resisten la deformación permanente a niveles de estrés más altos que aquellos con un menor límite elástico. Esta resistencia a la deformación es útil al permitir que las estructuras hechas a partir del material soporten mayores cargas antes de que la estructura se desvíe y se deforme permanentemente. Los materiales con mayor límite elástico pueden permitir de esa manera a los diseñadores de automóviles reducir el peso de parte asociada a través de la reducción de calibre mientras que mantienen la misma resistencia a la deformación en la parte. Muchos tipos de grados emergentes de AHSS de tercera generación sufren de bajos límites elásticos iniciales, a pesar de tener diversas combinaciones de resistencia a tracción y ductilidad.

30 Un componente en un automóvil que experimente un límite elástico temprano durante el servicio normal y experimente una deformación plástica permanente sería inaceptable con base en la mayoría de los criterios de diseño. Sin embargo, en evento de choque, pueden ser ventajosos los límites elásticos más bajos, especialmente cuando se combinan con un alto coeficiente de endurecimiento por deformación. Esto es especialmente cierto en los extremos delantero y trasero de un compartimiento de pasajeros que a menudo se denominan las zonas deformables. En estas áreas, un material de menor límite elástico con mayor ductilidad puede deformarse y endurecerse por deformación aumentando la resistencia durante el evento de choque lo que lleva a altos niveles de absorción de energía debido a la alta ductilidad de partida.

40 Para otras áreas del automóvil, un límite elástico bajo sería inaceptable. Específicamente, esto incluiría lo que se denomina la jaula de pasajeros de un automóvil. En la jaula de pasajeros, los materiales utilizados deben tener un alto límite elástico dado que solo se permite una deformación/intrusión muy limitada en la jaula de pasajeros. Una vez que se penetra la jaula de pasajeros esto puede llevar a lesiones o muerte de los ocupantes. De este modo, se requiere un material con alto límite elástico para estas áreas.

45 El límite elástico de un material se puede aumentar en un número de formas a escala industrial. El material se puede laminar en frío una pequeña cantidad (con una reducción < 2 %) en un proceso denominado laminación por templado. Este proceso introduce una pequeña cantidad de deformación plástica en el material, y el límite elástico del material aumenta ligeramente en correspondencia con la cantidad de deformación a la que fue sometido el material durante la pasada de templado. Otro método de aumento del límite elástico en el material es a través de una reducción en el tamaño de grano de cristal del material, conocido como fortalecimiento de Hall-Petch. Los granos de cristal más pequeños aumentan el estrés de cizallamiento requerido para el movimiento de dislocación inicial en el material, y la deformación inicial se retrasa hasta que se aplican cargas más altas. El tamaño de grano puede reducirse a través de modificaciones de proceso tales como programas de recocido alterados para limitar el crecimiento de grano durante el proceso de recristalización y crecimiento que se produce durante el recocido después de la deformación plástica.

50 Las modificaciones químicas a una aleación tal como la adición de elementos de aleación que existen en una solución sólida también pueden aumentar el límite elástico de un material, sin embargo, la adición de estos elementos de aleación debe tener lugar mientras el material está fundido y puede dar como resultado costes aumentados.

55 Desarrollar un alto límite elástico en la jaula de pasajeros a partir de una versión de AHSS de bajo límite elástico es una ruta posible. Sin embargo, en muchas operaciones metalúrgicas es difícil endurecer por deformación uniformemente la parte terminada. Esto significa que, aunque las áreas muy trabajadas en frío de una parte son de un

límite elástico mucho mayor, todavía habría áreas de menor límite elástico que podrían entonces deformarse y provocar una intrusión inaceptable en el espacio de pasajeros.

5 El acero trabajado en frío desde un estado completamente recocido es una ruta conocida para aumentar el límite elástico y resistencia a tracción. Se puede aplicar uniformemente a través de una lámina durante el procesamiento a través de laminación en frío aumentando el límite elástico y resistencia a tracción. Sin embargo, este enfoque da como resultado una disminución en el alargamiento total y a menudo a niveles muy por debajo de 20 %. A medida que disminuye el alargamiento, también disminuye la capacidad de formación en frío, reduciendo la capacidad de producir partes con geometrías complejas dando como resultado una disminución en la utilidad del AHSS. Generalmente se necesita una ductilidad más alta con un alargamiento total mínimo de 30 % para formar geometrías complejas a través de procesos de estampado en frío. Aunque se pueden usar procesos tales como formación por laminación para crear partes a partir de material de menor alargamiento, la complejidad geométrica de partes de estos procesos es limitada. La laminación en frío también puede introducir anisotropía en el material lo cual reducirá además su capacidad para ser formado en frío en partes. El documento US 2013/233452 A1 divulgó un método para producir una aleación metálica para su uso en vehículo. El documento WO 2015/099217 A1 divulgó un método para producir láminas eléctricas de acero de alto silicio.

#### Resumen

La presente invención se relaciona con un método para aumentar el límite elástico en una aleación metálica como se define en la reivindicación 1. Las realizaciones preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes 2-14.

#### Breve descripción de los dibujos

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

Figura 1 "Gráfico en Banana" de *World Auto Steel* con propiedades objetivo para AHSS de 3ra generación.

Figura 2 Resumen de método 1 para producir alto límite elástico en aleaciones en este documento.

25 Figura 3 Resumen de método 2 para producir alto límite elástico y combinaciones objetivo de propiedades en las aleaciones en este documento.

Figura 4 Resistencia última a tracción en aleaciones en este documento antes y después de laminación en frío.

Figura 5 Alargamiento a tracción en aleaciones en este documento antes y después de laminación en frío.

Figura 6 Límite elástico en aleaciones en este documento antes y después de laminación en frío.

30 Figura 7 Porcentaje en volumen de fase magnética en aleaciones en este documento antes y después de laminación en frío.

Figura 8 Curvas de estrés-deformación por tracción para aleación 2 después de laminación en frío con diversas reducciones.

Figura 9 Micrografía de SEM retrodispersada de la microestructura en la banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

35 Figura 10 Micrografía de TEM de campo claro de la microestructura en la banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

Figura 11 Micrografía de TEM que muestra precipitados a nanoescala en la banda caliente desde aleación 2.

Figura 12 Micrografía de SEM retrodispersada de la microestructura en la lámina laminada en frío desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

40 Figura 13 Micrografía de TEM de la microestructura en la lámina laminada en frío desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

Figura 14 Micrografía de TEM que muestra precipitados a nanoescala encontrados en lámina de aleación 2 después de deformación en frío.

45 Figura 15 Curvas de estrés - deformación por tracción de ingeniería para aleación 2 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

Figura 16 Cambio en porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) durante la prueba de tracción en aleación 2.

Figura 17 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 7 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

- Figura 18 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 18 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.
- Figura 19 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 34 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.
- 5 Figura 20 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 37 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.
- Figura 21 Curvas de estrés - deformación de ingeniería representativas para aleación 2 que fue laminada a 200 °C con diversas reducciones por laminación.
- 10 Figura 22 El límite elástico y resistencia última a tracción de aleación 2 como una función de reducción por laminación a 200 °C.
- Figura 23 El límite elástico y alargamiento total de aleación 2 como una función de reducción por laminación a 200 °C.
- Figura 24 El efecto de laminación a 200 °C sobre la transformación de fase inducida por deformación en aleación 2 como una función de reducción por laminación.
- 15 Figura 25 Micrografía de SEM retrodispersada de microestructura en banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.
- Figura 26 Micrografías de SEM retrodispersadas de microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C hasta reducción de 30 %: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.
- Figura 27 Micrografías de SEM retrodispersadas de microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C hasta una reducción de 70 %: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.
- 20 Figura 28 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 10 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.
- Figura 29 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 30 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.
- 25 Figura 30 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 70 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.
- Figura 31 Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 2 procesadas mediante combinación de métodos de laminación.
- Figura 32 Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 7 procesadas mediante combinación de métodos de laminación.
- 30 Figura 33 Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 18 procesadas mediante combinación de métodos de laminación.
- Figura 34 Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 34 procesadas mediante combinación de métodos de laminación.
- 35 Figura 35 Comparación de curvas de estrés-deformación de ingeniería para lámina de aleación 2 procesadas por diferentes métodos y su combinación.
- Figura 36 Alargamiento a tracción y porcentaje en volumen de fases magnéticas en un calibre de muestra de tracción después de prueba de aleación 2 a diferentes temperaturas.
- Figura 37 Porcentaje en volumen de fases magnéticas como una función de reducción por laminación a temperatura ambiente y a 200°C.
- 40 Figura 38 Ejemplos de curvas de estrés-deformación de ingeniería para la lámina recocida producida tanto por laminación en frío como por laminación a 200 °C.
- Figura 39 Límite de reducción por laminación vs temperatura de laminación para aleación 2.

#### Descripción detallada

- 45 La figura 2 representa un resumen de método 1 preferido para desarrollar altos límites elásticos a partir de un material de bajo límite elástico por una ruta que da como resultado cualquiera de dos condiciones proporcionadas en las condiciones 3a o 3b. En la etapa 1 de método 1, la condición de partida es suministrar una aleación de metal. Esta aleación de metal comprenderá al menos 70 % atómico de hierro y al menos cuatro o más elementos seleccionados

a partir de Si, Mn, Cr, Ni, Cu o C. La química de aleación se funde y preferiblemente se enfría a una tasa de  $10^{-4}$  K/s a  $10^3$  K/s y se solidifica a un espesor de  $>5.0$  mm a 500 mm. El proceso de fundición se puede hacer en una amplia variedad de procesos que incluyen fundición de lingotes, fundición de tochos, fundición continua, fundición de losas delgadas, fundición de losas gruesas, fundición de tiras delgadas, fundición de cintas etc. Métodos preferidos serían fundición continua en forma de lámina mediante fundición de losas delgadas, fundición de losas gruesas, y fundición de tiras delgadas. Aleaciones preferidas exhibirían una fracción de austenita ( $\gamma$ -Fe) de al menos 10 por ciento en volumen hasta 100 por ciento en volumen y todos los incrementos intermedios en el rango de temperatura desde 150 a 400 °C.

En la etapa 2 de método 1, la aleación se procesa preferiblemente en forma de lámina con espesor desde 0.5 a 5.0 mm. Esta etapa 2 puede involucrar laminación en caliente o laminación en caliente y laminación en frío. Si es laminación en caliente el rango de temperatura preferido sería a una temperatura de 700 °C y por debajo del  $T_m$  de dicha aleación. Si se emplea laminación en frío, tal se entiende que es a temperatura ambiente. Nótese que después de laminación en caliente o laminación en caliente y laminación en frío, la lámina puede adicionalmente tratarse térmicamente, preferiblemente en el rango desde una temperatura de 650 °C a una temperatura por debajo del punto de fusión ( $T_m$ ) de dicha aleación.

Las etapas para producir lámina a partir del producto fundido pueden por lo tanto variar dependiendo de las rutas de fabricación específicas y metas objetivo específicas. Como ejemplo, considerar la fundición de losas gruesas como una ruta de proceso para llegar a la lámina de este espesor objetivo. La aleación sería preferiblemente fundida pasando a través de un molde enfriado por agua típicamente en un rango de espesor de 150 a 300 mm en espesor. Después del enfriamiento el lingote fundido entonces se prepararía preferiblemente para la laminación en caliente lo cual puede involucrar algún tratamiento superficial para retirar los defectos superficiales incluyendo óxidos. Luego el lingote pasaría por un rodillo caliente de tren desbastador que puede involucrar varias pasadas que dan como resultado una losa de barra de transferencia típicamente desde 15 a 100 mm en espesor. Esta barra de transferencia luego pasaría por soportes de acabado de laminación en caliente sucesivas/en tándem para producir bobinas de banda caliente que típicamente son desde 1.5 a 5.0 mm en espesor. Si se necesita una reducción de calibre adicional, la laminación en frío se puede hacer con diversas reducciones por pasada, número variable de pasadas y en diferentes laminadores incluyendo laminadores en tándem, laminadores en Z, y laminadores reversibles. Típicamente el espesor laminado en frío sería 0.5 a 2.5 mm. Preferiblemente, el material laminado en frío se recoce para restaurar la ductilidad perdida a partir del proceso de laminación en frío ya sea parcial o completamente a un rango de temperatura desde 650 °C a una temperatura por debajo del punto de fusión ( $T_m$ ) de dicha aleación.

Otro ejemplo sería procesar preferentemente el material fundido a través de un proceso de fundición de losas delgadas. En este caso después de que la fundición típicamente forma 35 a 150 mm en espesor al pasar por un molde enfriado por agua, la losa recién formada pasa directamente a laminación en caliente sin enfriarse con un horno de túnel auxiliar o calentamiento por inducción aplicado para llevar la losa directamente hasta la temperatura objetivo. Luego la losa se lamina en caliente directamente en laminadores de acabado de soportes múltiples que son preferiblemente desde 1 a 10 en número. Después de la laminación en caliente, la tira se lamina en bobinas de banda caliente con un espesor típico desde 1 a 5 mm en espesor. Si se necesita procesamiento adicional, se puede aplicar la laminación en frío de una manera similar como anteriormente. Nótese que la fundición de tochos sería similar a los ejemplos anteriores pero se podría fundir un mayor espesor típicamente desde 200 a 500 mm de espesor y se necesitarían las etapas iniciales de rompedor para reducir el espesor inicial fundido y permitir que pase por un tren desbastador de laminación en caliente.

A pesar del proceso específico al pasar desde el material fundido en la etapa 1 a etapa 2, una vez que la lámina se forma en el rango preferido desde 0.5 mm a 5.0 mm, la lámina exhibirá entonces un alargamiento total de  $X_1$  (%), una resistencia última a tracción de  $Y_1$  (MPa) y un límite elástico de  $Z_1$  (MPa). Propiedades preferidas para esta aleación serían valores de resistencia última a tracción desde 900 a 2050 MPa, alargamiento a tracción desde 10 a 70 %, y límite elástico está en un rango desde 200 a 750 MPa.

En la etapa 3 de método 1, la aleación se deforma permanentemente (es decir plásticamente) en el rango de temperatura desde 150 °C a 400 °C. Tal deformación permanente puede proporcionarse mediante laminación y provocando una reducción en espesor. Esto se puede hacer por ejemplo durante las etapas finales del desarrollo de una bobina de acero. En lugar de hacer la laminación en frío tradicional para la reducción de calibre final con la lámina a partir de la temperatura ambiente, la laminación a temperatura elevada ahora se hace preferiblemente en el rango de temperatura objetivo de 150 a 400 °C. Un método sería calentar la lámina al rango de temperatura objetivo antes de pasar por el laminador en frío. La lámina podría calentarse mediante una variedad de métodos incluyendo pasar por un laminador de túnel, un calentador radiativo, un calentador de resistencia, o un calentador de inducción. Otro método sería calentar directamente los rodillos de reducción. Un tercer ejemplo para ilustración sería recocer por lotes a baja temperatura la lámina y luego enviar ésta a través de los laminadores en frío en el rango de temperatura objetivo. Alternativamente, la lámina se puede deformar en el rango de temperaturas elevadas en partes usando una variedad de procesos que proporcionan una deformación permanente durante la fabricación de partes por diversos métodos que incluyen formación por laminación, estampado de metal, estirado de metal, hidroformación etc.

A pesar del proceso específico para deformar permanentemente la aleación en el rango de temperatura de 150 a 400 °C, se pueden formar dos condiciones distintas que se muestran en la condición 3a y condición 3b en la figura 2. En

la condición 3a, comparando dicha aleación en la etapa 2 y después de la etapa 3, el alargamiento total y resistencia última a tracción no se afectan relativamente pero el límite elástico se aumenta. Específicamente, el alargamiento total  $X_2$  es igual a  $X_1 \pm 7.5 \%$ , la resistencia a tracción  $Y_2$  es igual a  $Y_1 \pm 100$  MPa, y el límite elástico  $Z_2$  es  $\geq Z_1 + 100$  MPa. Propiedades preferidas para esta aleación en la condición 3a serían valores de resistencia última a tracción ( $Y_2$ ) desde 800 a 2150 MPa, alargamiento a tracción ( $X_2$ ) desde 2.5 % a 77.5 %, y límite elástico ( $Z_2$ )  $\geq 300$  MPa. Más preferiblemente, el límite elástico puede caer en el rango de 300 a 1000 MPa.

En la condición 3b, comparando dicha aleación en la etapa 2 y después de la etapa 3, la resistencia última a tracción no se afecta relativamente pero el límite elástico se aumenta. Específicamente, la resistencia última a tracción  $Y_3$  es igual a  $Y_1 \pm 100$  MPa y el límite elástico  $Z_3$  es  $\geq Z_1 + 200$  MPa. Propiedades preferidas para esta aleación en condición 3b serían valores de resistencia última a tracción ( $Y_3$ ) desde 800 a 2150 MPa y límite elástico ( $Z_3$ )  $\geq 400$  MPa. Más preferiblemente, el límite elástico puede caer en el rango de 400 a 1200 MPa. Además, a diferencia de la condición 3a, la caída de alargamiento total es superior a 7.5 %, es decir, en la etapa B, el alargamiento total ( $X_3$ ) se define como sigue:  $X_3 < X_1 - 7.5 \%$ .

Como se mostrará mediante diversos ejemplos de casos, con la deformación normal, un material metálico se endurecerá por deformación/endurecerá por trabajo. Esto se muestra por ejemplo mediante el exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) en la relación  $\sigma = K \epsilon^n$  entre el estrés ( $\sigma$ ) y deformación ( $\epsilon$ ). Las ramificaciones de esto es que a medida que un material se deforma permanentemente las propiedades básicas de material cambian. La comparación de la condición inicial con la condición final mostrará el comportamiento típico y esperado donde el límite elástico y la resistencia a tracción aumentan con reducciones proporcionales en la ductilidad total. Se proporcionan ejemplos de casos específicos para ilustrar este efecto y luego contrastar esto con el nuevo comportamiento de material anotado en esta divulgación.

La figura 3 identifica un resumen de método 2 de la presente divulgación. Las primeras 3 etapas en el método 2 son idénticas al método 1 siendo la etapa 4 una etapa adicional para el método 2. Como se muestra la etapa 4 se puede aplicar a las aleaciones en este documento ya sea en la condición 3a o condición 3b.

Como se presentó previamente, en la descripción de la figura 2, se proporcionan diversas combinaciones de propiedades (es decir alargamiento total, resistencia última a tracción, y límite elástico) para cada condición 3a o 3b. Como se ilustrará además en la descripción detallada y ejemplos de casos subsecuentes, las aleaciones en la condición 3a o 3b pueden hacerse caracterizarse además por su estructura particular. Esto permite entonces una adaptación adicional de las propiedades finales mediante el uso de una etapa opcional adicional de deformar permanente las aleaciones a temperaturas desde ambiente hasta  $\leq 150$  °C, o más preferiblemente en un rango de temperaturas de 0 °C a 150 °C. Esto se puede hacer por ejemplo agregando otra etapa durante la producción de bobinas de acero como se ilustra en la figura 3. En este caso la etapa 4 puede ser una pasada de revestimiento (es decir una pequeña pasada de laminación de reducción que a veces también se usa para mejoras en calidad de superficie o nivelado) desde 0.5 a 2.0 % de reducción o en reducciones mayores desde  $>2 \%$  a 50 % para desarrollar combinaciones específicas de propiedades. Se pueden hacer enfoques alternativos por ejemplo al fabricar partes a partir de lámina que ha sido procesada por el método 1. En la etapa 4 opcional de método 2, la lámina se podría transformar subsecuentemente en partes usando una variedad de procesos de deformación que incluyen formación por laminación, estampado de metal, estirado de metal, hidroformación etc. A pesar del proceso exacto para activar la etapa 4 en el método 2, se pueden desarrollar propiedades finales con la dicha aleación que se contemplan para exhibir propiedades con alargamiento a tracción desde 10 a 40 %, resistencia última a tracción desde 1150 a 2000 MPa, y límite elástico desde 550 a 1600 MPa).

Aleaciones

Las estructuras y mecanismos en esta aplicación que llevan a la nueva ruta de proceso para desarrollar un alto límite elástico están vinculados a las siguientes químicas de aleaciones proporcionadas en la tabla 1.

Tabla 1

Composición química de aleaciones (% atómico)							
Aleación	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	C
Aleación 1	75.75	2.63	1.19	13.86	5.13	0.65	0.79
Aleación 2	74.75	2.63	1.19	14.86	5.13	0.65	0.79
Aleación 3	77.31	2.63	8.49	5.00	5.13	0.65	0.79
Aleación 4	77.14	2.63	6.49	7.17	5.13	0.65	0.79
Aleación 5	76.24	2.63	4.49	10.07	5.13	0.65	0.79

## ES 2 933 436 T3

Aleación 6	75.34	2.63	2.49	12.97	5.13	0.65	0.79
Aleación 7	78.92	2.63	6.49	5.39	5.13	0.65	0.79
Aleación 8	77.34	2.63	4.49	8.97	5.13	0.65	0.79
Aleación 9	75.77	2.63	2.49	12.54	5.13	0.65	0.79
Aleación 10	75.90	2.63	3.74	11.16	5.13	0.65	0.79
Aleación 11	77.73	2.63	3.74	9.33	5.13	0.65	0.79
Aleación 12	79.57	2.63	3.74	7.49	5.13	0.65	0.79
Aleación 13	75.97	2.63	3.74	10.09	5.13	1.65	0.79
Aleación 14	77.80	2.63	3.74	8.26	5.13	1.65	0.79
Aleación 15	79.64	2.63	3.74	6.42	5.13	1.65	0.79
Aleación 16	76.88	2.63	3.74	9.18	5.13	1.65	0.79
Aleación 17	76.83	2.63	3.74	9.85	5.13	1.03	0.79
Aleación 18	76.57	2.63	3.06	10.17	5.13	1.65	0.79
Aleación 19	76.52	2.63	3.06	10.84	5.13	1.03	0.79
Aleación 20	78.02	1.13	3.06	10.84	5.13	1.03	0.79
Aleación 21	80.02	1.13	3.06	10.84	3.13	1.03	0.79
Aleación 22	76.70	2.63	3.40	10.01	5.13	1.34	0.79
Aleación 23	76.20	3.13	3.40	10.01	5.13	1.34	0.79
Aleación 24	75.70	3.63	3.40	10.01	5.13	1.34	0.79
Aleación 25	77.70	2.63	3.40	10.01	4.13	1.34	0.79
Aleación 26	75.70	2.63	3.40	10.01	6.13	1.34	0.79
Aleación 27	77.20	2.63	3.40	10.01	4.13	1.34	1.29
Aleación 28	75.20	2.63	3.40	10.01	6.13	1.34	1.29
Aleación 29	76.98	2.88	3.40	10.01	4.63	1.34	0.76
Aleación 30	77.23	2.88	3.15	10.01	4.63	1.34	0.76
Aleación 31	77.48	2.88	2.90	10.01	4.63	1.34	0.76
Aleación 32	77.73	2.88	2.65	10.01	4.63	1.34	0.76
Aleación 33	77.98	2.88	2.40	10.01	4.63	1.34	0.76
Aleación 34	74.59	2.61	0.00	15.17	3.59	1.86	2.18
Aleación 35	82.22	3.69	9.94	0.00	2.26	0.37	1.52
Aleación 36	76.17	8.64	0.90	11.77	0.00	1.68	0.84
Aleación 37	82.77	4.41	6.66	3.19	1.14	1.16	0.67
Aleación 38	76.55	0.78	0.72	14.43	3.42	0.42	3.68
Aleación 39	81.44	0.00	4.42	10.33	2.87	0.00	0.94
Aleación 40	81.00	1.22	0.89	13.45	2.66	0.78	0.00

## ES 2 933 436 T3

Aleación 41	81.68	2.24	3.25	9.87	0.00	1.55	1.41
-------------	-------	------	------	------	------	------	------

Como se puede ver a partir de la tabla 1, las aleaciones en este documento son aleaciones de metal basadas en hierro, que tienen más de 70% at. de Fe. Además, se puede apreciar que las aleaciones en este documento son de tal manera que comprenden Fe y al menos cuatro o más, o cinco o más, o seis elementos seleccionados a partir de Si, Mn, Cr, Ni, Cu o C. Por consiguiente, con respecto a la presencia de cuatro o más, o cinco o más elementos seleccionados a partir de Si, Mn, Cr, Ni, Cu o C, tales elementos están presentes en los siguientes porcentajes atómicos indicados: Si (0 a 6.13 at.%); Mn (0 a 15.17 at. %); Cr (0 a 8.64 at. %); Ni (0 a 9.94 at. %); Cu (0 a 1.86 at. %); y C (0 a 3.68 at. %). Lo más preferiblemente, las aleaciones en este documento son de tal manera que comprenden, consisten esencialmente en, o consisten en Fe a un nivel de 70 % at. o mayor junto con Si, Mn, Cr, Ni, Cu y C, en donde el nivel de impurezas de todos los otros elementos está en el rango desde 0 a 5000 ppm.

### Fundición de losa de laboratorio

Las aleaciones fueron pesadas en cargas de 3,400 gramos usando polvos ferroaditivos disponibles comercialmente y una materia prima de acero base con una química conocida de acuerdo con las relaciones atómicas en la tabla 1. Como se aludió anteriormente, las impurezas pueden estar presentes en diversos niveles dependiendo de la materia prima usada. Los elementos de impureza comúnmente incluirían los siguientes elementos; Al, Co, Mo, N, Nb, P, Ti, V, W, y S que si estuvieran presentes estarían en el rango desde 0 a 5000 ppm (partes por millón) con rangos preferidos de 0 a 500 ppm.

Las cargas fueron cargadas en un crisol de sílice recubierto de zirconio que fue colocado en una máquina de fundición basculante al vacío Indutherm VTC800V. Luego la máquina evacuó las cámaras de fundición y fusión y vació dos veces con argón a presión atmosférica antes de la fundición para evitar la oxidación de la masa fundida. La masa fundida fue calentada con una bobina de inducción de RF de 14 kHz hasta que se fundió por completo, aproximadamente desde 5 a 7 minutos dependiendo de la composición de aleación y masa de carga. Después de que fue observado que los últimos sólidos se fundían se dejó calentar durante unos 30 a 45 segundos adicionales para proporcionar sobrecalentamiento y asegurar la homogeneidad de masa fundida. Luego la máquina de fundición evacuó la cámara e inclinó el crisol y vertió la masa fundida en un canal de 50 mm de espesor, 75 a 80 mm de ancho, y 125 mm de profundidad en un troquel de cobre enfriado por agua y representaría la etapa 1 en las figuras 2 y 3. El proceso se puede adaptar a un espesor similar a fundido preferido en un rango desde >5.0 a 500 mm. Se dejó enfriar la masa fundida al vacío durante 200 segundos antes de que fuera llenada la cámara con argón a presión atmosférica.

### Laminación en caliente de laboratorio

Las aleaciones en este documento fueron procesadas preferiblemente en una lámina de laboratorio. El procesamiento de aleaciones en laboratorio se desarrolla para simular la producción de bandas calientes a partir de losas producidas por fundición continua y representaría la etapa 2 en las figuras 2 y 3. La laminación en caliente industrial se realiza calentando una losa en un horno de túnel a una temperatura objetivo, luego pasándola a través de ya sea un laminador inversor o un laminador de soporte múltiple o una combinación de ambos para alcanzar el calibre objetivo en un rango de temperatura preferido desde 700 °C hasta el punto de fusión (Tm) de la aleación. Durante la laminación en cualquiera de los tipos de laminador la temperatura de la losa disminuye constantemente debido a la pérdida de calor hacia el aire y hacia los rodillos de trabajo por lo que la banda caliente final está a una temperatura muy reducida. Esto se simula en el laboratorio calentando en un horno de túnel entre 1100 °C y 1250 °C, luego laminando en caliente. El laminador de laboratorio es más lento que los laminadores industriales lo que provoca una mayor pérdida de calor durante cada pasada de laminación en caliente por lo que la losa se recalienta durante 4 minutos entre pasadas para reducir la caída en temperatura, la temperatura final en el calibre objetivo cuando sale del laminador de laboratorio comúnmente está en el rango desde 1000 °C a 800 °C, dependiendo de la temperatura de horno y espesor final.

Antes de la laminación en caliente, las losas de laboratorio fueron precalentadas en un horno Lucifer EHS3GT-B18 para calentar. El punto de ajuste de horno varía entre 1100 °C y 1250 °C, dependiendo del punto de fusión de aleación y el punto en el proceso de laminación en caliente, con las temperaturas iniciales establecidas más altas para facilitar mayores reducciones, y temperaturas posteriores establecidas más bajas para minimizar la oxidación de superficie en la banda caliente. Las losas se dejaron en remojo durante 40 minutos antes de la laminación en caliente para asegurar que alcanzaran la temperatura objetivo y luego se empujaron fuera del horno de túnel a un laminador alto Fenn Modelo 061 2. Las piezas fundidas de 50 mm se laminan en caliente durante 5 a 10 pasadas a través del laminador antes de permitir que se enfríen al aire. Los rangos de espesor final después de laminación en caliente son preferiblemente desde 1.8 mm a 4.0 mm con una reducción variable por pasada que oscila desde 20 % a 50 %.

Después de la laminación en caliente, el espesor de losa se ha reducido a un espesor final de la banda caliente desde 1.8 a 2.3 mm. Las condiciones de procesamiento se pueden ajustar cambiando la cantidad de laminación en caliente y/o agregando etapas de laminación en frío para producir el rango de espesor preferido desde 0.5 a 5.0 mm. Los especímenes de tracción fueron cortados desde una banda caliente de laboratorio usando EDM por alambre. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 3369), utilizando el software

## ES 2 933 436 T3

de control y análisis Bluehill de Instron. Las propiedades de tracción de las aleaciones en la condición laminada en caliente, se enumeran en la tabla 2 que se han procesado hasta un espesor desde 1.8 a 2.3 mm.

Los valores de resistencia última a tracción pueden variar desde 913 a 2000 MPa con un alargamiento a tracción desde 13.8 a 68.5%. El límite elástico está en un rango desde 250 a 711 MPa. Las propiedades mecánicas de la banda caliente desde las aleaciones de acero en este documento dependen de la química de aleación, condiciones de procesamiento, y respuesta mecánica de material a las condiciones de procesamiento.

5

Tabla 2

Propiedades de tracción de aleaciones en condición laminada en caliente						
Aleación	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico	Exponente de endurecimiento por deformación (n) en un rango de deformación		
	(%)	(MPa)	(MPa)	Punto de límite elástico a 5%	5% a 15%	25% a estrés máx.
Aleación 1	51.4	1248	294	0.29	0.38	0.67
	49.2	1253	310	0.31	0.42	0.64
	31.2	1093	396	0.28	0.39	0.71
Aleación 2	57.6	1175	311	0.29	0.38	0.83
	58.6	1209	294	0.31	0.40	0.64
	56.6	1167	302	0.29	0.38	0.45
Aleación 3	55.4	1163	330	0.08	0.52	0.82
	59.5	1154	373	0.06	0.47	0.73
	58.1	1165	347	0.07	0.44	0.84
Aleación 4	59.8	1220	342	0.12	0.40	0.78
	51.6	1241	338	0.12	0.41	0.78
	55.5	1245	375	0.10	0.38	0.80
	54.6	1324	377	0.11	0.41	0.77
Aleación 5	54.3	1248	325	0.18	0.40	0.80
	53.1	1218	313	0.18	0.42	0.74
	50.6	1258	304	0.21	0.42	0.79
	54.1	1242	331	0.18	0.39	0.75
Aleación 6	58.3	1212	330	0.21	0.38	0.71
	53.7	1212	283	0.26	0.42	0.72
	58.7	1193	315	0.23	0.40	0.72
Aleación 7	28.1	1508	333	0.28	0.89	-
	28.5	1516	331	0.26	0.93	-
	26.0	1520	317	0.26	0.90	-
Aleación 8	41.2	1343	330	0.17	0.44	0.78
	32.8	1281	328	0.17	0.44	0.94

ES 2 933 436 T3

	45.7	1387	336	0.16	0.42	0.71
	41.4	1375	328	0.17	0.42	0.84
Aleación 9	48.1	1248	300	0.25	0.40	0.75
	50.5	1293	304	0.27	0.41	0.70
	52.0	1280	303	0.25	0.40	0.72
Aleación 10	58.5	1229	379	0.18	0.31	0.73
	57.8	1223	384	0.18	0.32	0.72
	59.0	1220	389	0.19	0.31	0.71
Aleación 11	45.3	1411	360	0.15	0.44	0.74
	40.2	1460	359	0.17	0.45	0.74
	41.3	1429	325	0.20	0.53	0.74
	47.1	1448	347	0.17	0.48	0.70
Aleación 12	31.3	1624	250	-	1.34	-
	31.7	1581	304	0.19	1.24	-
	28.7	1610	319	0.16	1.23	-
Aleación 13	57.1	1101	358	0.16	0.34	0.79
	66.1	1120	362	0.14	0.34	0.82
	68.5	1114	362	0.15	0.33	0.80
	60.1	1120	350	0.14	0.34	0.83
Aleación 14	45.1	1371	354	0.11	0.59	0.69
	40.6	1403	363	0.11	0.62	0.66
	42.3	1403	364	0.11	0.55	0.69
	46.9	1379	341	0.12	0.63	0.65
Aleación 15	26.2	1579	295	0.47	0.89	-
	25.2	1593	264	-	0.98	-
	24.6	1588	302	0.45	0.84	-
Aleación 16	54.8	1239	379	0.13	0.34	0.76
	58.5	1207	341	0.15	0.42	0.80
	55.8	1207	359	0.13	0.39	0.82
Aleación 17	51.3	1270	354	0.16	0.36	0.80
	50.1	1328	384	0.15	0.35	0.81
Aleación 18	58.8	1224	384	0.14	0.33	0.78
	56.1	1245	390	0.14	0.32	0.79
	50.7	1190	365	0.14	0.33	0.82
Aleación 19	47.4	1263	348	0.17	0.34	0.79

ES 2 933 436 T3

	50.7	1260	362	0.17	0.34	0.79
	51.8	1277	363	0.17	0.34	0.80
Aleación 20	40.1	1337	376	0.15	0.36	0.85
	43.9	1343	375	0.14	0.35	0.83
	44.7	1328	394	0.15	0.36	0.88
Aleación 21	45.2	1277	327	0.18	0.45	0.76
	46.1	1318	340	0.17	0.44	0.76
	54.2	1310	325	0.18	0.46	0.71
Aleación 22	49.6	1272	369	0.15	0.36	0.83
	54.9	1275	354	0.14	0.36	0.77
	54.8	1271	319	0.17	0.42	0.73
	52.4	1297	340	0.16	0.38	0.79
Aleación 23	53.5	1246	344	0.16	0.4	0.78
	55.9	1226	359	0.15	0.34	0.76
	51.2	1232	346	0.16	0.36	0.77
	52.7	1228	375	0.14	0.34	0.78
Aleación 24	57.0	1209	356	0.15	0.35	0.77
	54.6	1202	348	0.15	0.36	0.83
	55.1	1207	363	0.15	0.34	0.80
	56.9	1225	338	0.16	0.38	0.78
Aleación 25	53.4	1227	357	0.15	0.37	0.78
	56.5	1249	325	0.16	0.39	0.77
	54.5	1214	345	0.14	0.37	0.79
	49.5	1220	343	0.15	0.38	0.83
Aleación 26	49.0	1319	340	0.16	0.37	0.79
	48.4	1320	344	0.17	0.35	0.79
	50.5	1304	331	0.19	0.38	0.79
	51.1	1296	346	0.16	0.36	0.77
Aleación 27	56.5	967	404	0.11	0.31	0.66
	54.5	956	421	0.11	0.31	0.66
	67.6	979	417	0.11	0.31	0.66
	52.0	942	390	0.12	0.33	0.66
Aleación 28	50.4	1121	442	0.11	0.30	0.77
	49.8	1088	407	0.13	0.33	0.78
	51.8	1116	423	0.13	0.32	0.77

ES 2 933 436 T3

Aleación 29	56.0	1229	422	0.14	0.30	0.70
	56.3	1247	409	0.15	0.30	0.74
	54.6	1226	405	0.15	0.31	0.71
	50.0	1196	421	0.18	0.32	0.73
	56.3	1199	412	0.15	0.31	0.69
	53.3	1205	402	0.16	0.33	0.67
Aleación 30	52.1	1271	421	0.16	0.30	0.74
	51.4	1284	416	0.14	0.32	0.74
	50.6	1269	407	0.15	0.33	0.72
	53.9	1248	418	0.14	0.32	0.68
	49.9	1237	399	0.16	0.34	0.69
	54.8	1241	407	0.17	0.31	0.71
Aleación 31	48.6	1326	379	0.17	0.34	0.74
	51.3	1323	390	0.16	0.33	0.71
	51.6	1293	372	0.17	0.35	0.72
	51.4	1314	374	0.17	0.34	0.72
Aleación 32	49.5	1347	383	0.17	0.37	0.65
	47.0	1367	388	0.17	0.36	0.68
	47.9	1341	381	0.17	0.36	0.75
	47.8	1391	431	0.15	0.33	0.67
Aleación 33	44.8	1373	372	0.18	0.38	0.68
	42.3	1392	381	0.17	0.40	0.72
	40.7	1388	381	0.17	0.40	0.69
Aleación 34	65.9	963	515	0.09	0.27	0.47
	58.7	954	485	0.10	0.28	0.47
	62.1	970	545	0.08	0.26	0.46
Aleación 35	19.6	2000	533	0.29	0.31	-
	22.3	1976	511	0.20	0.30	-
	19.8	1995	526	0.31	0.29	-
Aleación 36	60.1	1091	439	0.11	0.31	0.60
	61.0	1114	469	0.10	0.28	0.61
	59.4	1137	481	0.10	0.29	0.62
Aleación 37	13.8	1572	649	0.13	-	-
	14.1	1619	711	0.18	-	-
	14.6	1610	692	0.19	-	-

Aleación 38	58.9	1105	531	0.11	0.30	0.52
	61.4	1108	524	0.10	0.30	0.52
	58.6	1106	511	0.10	0.30	0.52
Aleación 39	51.0	1317	354	0.16	0.39	0.71
	50.5	1334	370	0.15	0.38	0.71
	50.5	1325	368	0.14	0.38	0.69
Aleación 40	47.9	1374	330	0.22	0.38	0.74
	48.8	1336	317	0.24	0.39	0.64
	41.5	1362	321	0.23	0.39	0.77
Aleación 41	51.1	963	472	0.08	0.29	0.58
	48.4	913	463	0.08	0.29	0.55

### Ejemplos de casos

Ejemplo de caso comparativo #1 respuesta convencional a laminado a temperatura ambiente

- 5 La banda caliente desde las aleaciones enumeradas en este documento en la tabla 1 fue, con propósitos de comparación, laminada en frío hasta un espesor de calibre objetivo final de 1.2 mm a través de múltiples pasadas de laminación en frío. Fueron contados especímenes de tracción desde cada lámina laminada en frío usando EDM por alambre. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 3369), utilizando el software de control y análisis Bluehill de Instron. Todas las pruebas fueron ejecutadas a temperatura ambiente en control de desplazamiento.
- 10 Las propiedades de tracción de aleaciones en este documento después de laminación en frío se enumeran en la tabla 3. Como se puede ver, el límite elástico aumenta significativamente sobre el rango en una banda caliente con máximo de 711 MPa (tabla 2). Después de la laminación en frío el límite elástico varía desde 1037 a 2000 MPa. Los valores de resistencia última a tracción después de laminación en frío están en un rango desde 1431 a 2222 MPa. Sin embargo, se registra una caída en alargamiento a tracción para cada aleación en este documento después de laminación en frío con una variación desde 4.2 a 31.1%. Las tendencias generales en el efecto de laminación en frío sobre las propiedades de tracción de las aleaciones en este documento se ilustran en la figura 4 a figura 6.
- 15

Tabla 3

Propiedades de tracción de aleaciones en calibre final después de laminación en frío				
Aleación	Reducción por laminación en frío	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico
	(%)			
Aleación 1	38.0	20.5	1712	1114
		20.4	1712	1131
Aleación 2	29.4	21.8	1603	1135
		23.2	1612	1111
		25.7	1589	1120
Aleación 10	35.1	20.1	1715	1038
		20.5	1716	1280
		20.5	1729	1173
Aleación 11	32.7	13.9	1893	1320

ES 2 933 436 T3

		15	1906	1467
		15.6	1875	1536
Aleación 12	33.8	5.5	2125	1913
		5.9	2116	1720
		4.2	2114	1675
Aleación 13	36.5	22.8	1500	1182
		24.0	1523	1204
		23.9	1518	1098
Aleación 14	34.5	18.6	1790	1561
		20.2	1793	1436
		17.9	1726	1491
Aleación 15	37.3	5.0	2051	1784
		6.2	2073	2000
		6.3	2057	1957
Aleación 16	36.9	19.9	1700	1413
		19.7	1689	1436
		21.1	1704	1302
Aleación 17	36.0	20.1	1765	1379
		20.2	1759	1306
		17.2	1764	1374
Aleación 18	37.3	20.6	1708	1388
		20.0	1721	1326
		18.9	1709	1369
Aleación 19	38.0	18.9	1810	1213
		19.3	1807	1324
		19.2	1806	1260
Aleación 20	38.3	15.1	1864	1404
		16.2	1884	1461
		17.1	1879	1512
Aleación 21	34.1	18.6	1780	1374
		18.0	1785	1414
		18.6	1786	1423
Aleación 22	38.0	17.3	1759	1356
		21.3	1736	1196
		18.8	1757	1304

ES 2 933 436 T3

Aleación 23	37.4	19.3	1718	1240
		20.4	1728	1283
		19.0	1727	1271
Aleación 24	37.5	22.0	1709	1136
		12.6	1695	1256
		14.8	1706	1258
Aleación 25	33.5	19.8	1715	1326
		20.2	1704	1320
		21.0	1700	1316
Aleación 29	38.8	18.1	1718	1483
		18.6	1712	1454
		19.4	1720	1407
Aleación 30	39.9	17.7	1770	1335
		17.7	1764	1430
		17.9	1765	1515
Aleación 31	40.5	17.5	1834	1524
		16.9	1831	1707
		16.0	1837	1578
Aleación 32	41.1	15.7	1890	1442
		14.8	1897	1563
		15.4	1886	1676
Aleación 33	38.2	15.4	1891	1533
		16.3	1889	1604
		15.8	1895	1419
Aleación 34	39.0	10.9	1519	1249
		9.4	1515	1037
		10.8	1519	1345
Aleación 35	19.6	16.2	2222	1693
		16.4	2216	1735
		16.2	2217	1657
Aleación 36	36.7	16.4	1641	1116
		20.6	1604	1187
		19.1	1623	1295
Aleación 37	36.3	7.1	1949	1617
		6.6	1977	1824

		6.5	1975	1834
Aleación 38	43.0	7.0	1727	1539
		9.7	1721	1373
		10.0	1717	1490
		16.0	1869	1289
Aleación 39	36.5	19.0	1840	1471
		19.0	1837	1245
		15.6	1917	1238
Aleación 40	37.4	17.2	1913	1361
		17.7	1917	1192
		28.6	1452	1121
Aleación 41	39.2	31.1	1445	1101
		31.1	1431	1231

5 El contenido relativo de fases magnéticas fue medido por Feritscope tanto en una banda caliente como después de laminación en frío para cada aleación que se enumera en este documento en la tabla 4 e ilustra en la figura 7 para aleaciones seleccionadas. El porcentaje en volumen de fases magnéticas de 0.1 a 56.4 % Fe en una banda caliente aumenta al rango desde 1.6 a 84.9 % Fe después de laminación en frío lo que confirma una transformación de fase durante la deformación.

Tabla 4

Porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) en aleaciones después de laminación en frío		
Aleación	Banda caliente	Lámina laminada en frío
	(Fe%)	(Fe%)
Aleación 1	1.7	14.7
Aleación 2	1.3	18.0
Aleación 3	3.2	43.5
Aleación 4	0.3	55.8
Aleación 5	0.5	53.0
Aleación 6	0.4	45.0
Aleación 7	10.4	67.7
Aleación 8	0.9	57.8
Aleación 9	1.4	44.8
Aleación 10	2.7	40.3
Aleación 11	0.8	57.1
Aleación 12	1.5	70.6
Aleación 13	0.1	25.6
Aleación 14	0.4	52.2

## ES 2 933 436 T3

Aleación 15	1.6	65.6
Aleación 16	0.2	43.2
Aleación 17	0.6	56.9
Aleación 18	0.3	45.3
Aleación 19	0.4	55.9
Aleación 20	0.3	60.9
Aleación 21	0.5	56.3
Aleación 22	0.3	43.9
Aleación 23	0.3	53.5
Aleación 24	0.2	36.8
Aleación 25	0.4	42.6
Aleación 26	0.5	48.5
Aleación 27	0.1	12.6
Aleación 28	0.4	20.6
Aleación 29	4.2	42.8
Aleación 30	5.5	44.6
Aleación 31	6.5	49.3
Aleación 32	5.7	51.5
Aleación 33	7.3	56.3
Aleación 34	0.3	1.6
Aleación 35	43.3	67.7
Aleación 36	2.0	29.6
Aleación 37	56.4	84.9
Aleación 38	0.7	3.8
Aleación 39	8.2	50.0
Aleación 40	5.8	45.8
Aleación 41	5.2	26.4

5 Este ejemplo de caso comparativo demuestra que el límite elástico se puede aumentar en las aleaciones en este documento mediante laminación en frío (es decir a temperatura ambiente). La resistencia última a tracción también está aumentando pero la laminación en frío lleva a una disminución significativa en la ductilidad de aleación lo que se indica por una caída en el alargamiento a tracción que puede ser un factor limitante en ciertas aplicaciones. El endurecimiento, como se muestra por el aumento en la resistencia última a tracción, está relacionado con una transformación de fase de austenita a ferrita como se representa mediante las mediciones de porcentaje en volumen de fases magnéticas antes y después de laminación en frío.

Ejemplo de caso comparativo # 2 efecto de reducción por laminación en frío sobre límite elástico en aleación 2

10 La aleación 2 fue procesada en una banda caliente con un espesor de 4.4 mm. Luego la banda caliente fue laminada en frío con una reducción diferente a través de múltiples pasadas de laminación en frío (es decir a temperatura ambiente). Después de la laminación en frío las muestras fueron tratadas térmicamente con recocido intermedio a 850°C durante 10 min. Esto representó una condición de inicio para cada muestra que representó una condición

## ES 2 933 436 T3

recocida completa para retirar el trabajo en frío anterior. A partir de esta condición de inicio, fue aplicada la laminación en frío subsecuente a diferentes porcentajes (es decir 0 %, 4.4 %, 9.0 %, 15.1 %, 20.1 %, 25.1 % y 29.7 %) como se proporciona en la tabla 5 de tal manera que el calibre final para la prueba de tracción estaría en un espesor constante objetivo de 1.2 mm. Con la creciente reducción en frío como una etapa final después del recocido, se demuestra un aumento correspondiente del límite elástico de material mediante las curvas de estrés-deformación por tracción en la figura 8. Las propiedades de tracción desde las pruebas se enumeran en la tabla 5. El límite elástico de la aleación 2 aumenta a un rango desde 666 a 1140 MPa dependiendo del nivel de reducción en comparación con los valores iniciales en estado recocido (tabla 5). También, el porcentaje en volumen de fases magnéticas medido por Feritscope aumenta hasta el 12.9 % Fe como se muestra en la tabla 5 en comparación con el valor inicial de 1.0 % Fe en el estado recocido. Debe anotarse que el aumento de límite elástico se logra a expensas de la ductilidad de aleación con alargamiento a tracción disminuido después de laminación en frío.

Tabla 5

Propiedades de tracción y porcentaje en volumen de fases magnéticas en aleación 2 después de laminación en frío				
Reducción por laminación en frío (%)	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico	Porcentaje en volumen de fases magnéticas
	(%)	(MPa)	(MPa)	(Fe%)
0.0 (completamente recocido, es decir condición de partida)	60.1	1200	445	1.0
	58.1	1192	433	
	61.6	1222	444	
	55.2	1197	444	
	64.1	1212	446	
4.4	49.5	1262	667	1.7
	35.2	1230	666	
	43.4	1268	673	
	49.3	1298	679	
9.0	43.6	1325	736	2.3
	33.0	1340	738	
	40.3	1342	732	
	40.3	1346	737	
15.1	28.2	1422	865	6.2
	27.8	1441	865	
	30.0	1454	867	
	33.5	1445	869	
20.1	27.2	1510	980	9.1
	21.0	1512	960	
	20.4	1524	970	
	20.2	1515	990	
25.1	21.2	1555	1036	11.5
	22.7	1565	1037	

	24.5	1563	1051	
	25.1	1566	1058	
29.7	17.8	1628	1121	12.9
	21.0	1629	1105	
	19.0	1627	1137	
	20.0	1631	1140	

5 Este ejemplo de caso comparativo #2 demuestra que el límite elástico en las aleaciones en este documento puede modificarse mediante la reducción por laminación en frío para lograr valores de límite elástico relativamente más altos con un aumento en la resistencia a tracción pero con una disminución en ductilidad. Cuanto mayor sea la reducción por laminación en frío que se aplique, mayor será el límite elástico alcanzado y menor será el alargamiento a tracción registrado.

Ejemplo de caso comparativo #3 transformación estructural durante la laminación en frío en una banda caliente desde aleación 2

10 La banda caliente desde aleación 2 con un espesor de 4 mm fue laminada en frío hasta un espesor final de 1.2 mm a través de múltiples pasadas de laminación en frío con recocido intermedio a 850 °C durante 10 min. Las microestructuras de la banda caliente y la lámina laminada en frío fueron estudiadas mediante microscopía de electrones de barrido (SEM) y microscopía de electrones de transmisión (TEM).

15 Para preparar las muestras de SEM, las piezas fueron cortadas por EDM y montadas en epoxi, y pulidas progresivamente con solución de suspensión de diamante de 9 µm, 6 µm y 1 µm, y finalmente con sílice de 0.02 µm. Para preparar los especímenes de TEM, las muestras fueron cortadas desde la lámina con EDM, y luego se diluyeron triturando con almohadillas de tamaño de gravilla reducida cada vez. La dilución adicional a 60 a 70 µm de espesor se hace puliendo con solución de suspensión de diamante de 9 µm, 3 µm y 1 µm respectivamente. Fueron perforados discos de 3 mm en diámetro a partir de las láminas y el pulido final fue logrado con electropulido usando un pulidor de doble chorro. La solución química usada fue un ácido nítrico a 30% mezclado en base de metanol. En caso de que el área delgada sea insuficiente para la observación de TEM, los especímenes de TEM se pueden moler con iones usando un sistema de pulido de iones de precisión (PIPS) Gatan. La molienda de iones usualmente se hace a 4.5 keV, y el ángulo de inclinación se reduce desde 4° a 2° para abrir el área delgada. Los estudios de TEM fueron hechos usando un microscopio de alta resolución JEOL 2100 operado a 200 kV.

25 El análisis de SEM de la estructura de banda caliente reveló granos de austenita relativamente grandes con límites rectos (figura 9). La imagen de TEM de campo claro muestra que la estructura de banda caliente contiene muy pocas dislocaciones y los límites de granos son rectos y nítidos (figura 10) lo que es típico de las estructuras recristalizadas. Los estudios de TEM también mostraron que los nanoprecipitados están presentes en la microestructura (figura 11).

30 Cuando la banda caliente fue sometida a laminación en frío, la fase austenita en áreas seleccionadas de la estructura de banda caliente se transforma en fase de ferrita refinada bajo estrés. Las imágenes de SEM retrodispersadas de la lámina laminada en frío muestran la estructura transformada y refinada, y la presencia de maclas por deformación (figura 12). Como se muestra en las imágenes de TEM en la figura 13, se genera una alta densidad de dislocaciones en los granos de austenita retenidos y se forman granos refinados de ferrita con un tamaño de 200 a 300 nm. También fue observado maclado por deformación en los granos de austenita retenidos. También fue observada nanoprecipitación adicional como una parte del proceso de transformación de fase durante la laminación en frío (figura 14).

Este ejemplo de caso demuestra una evolución de microestructura a partir de la estructura austenítica de banda caliente inicial durante la laminación en frío que lleva al fortalecimiento de aleación (aumento en resistencia última a tracción) mediante el refinamiento de grano debido a la transformación de fase en ferrita con nanoprecipitación así como al aumento de densidad de dislocación y maclado por deformación.

40 Ejemplo de caso # 4 efecto de temperatura de laminación en límite elástico de aleación 2

45 El material de partida era una banda caliente desde aleación 2 con un espesor de aproximadamente 2.5 mm preparada por laminación en caliente de una losa fundida en laboratorio de 50 mm de espesor que simulaba el procesamiento en la producción comercial de bandas caliente. El material de partida tenía una resistencia última a tracción promedio de 1166 MPa, un alargamiento a tracción promedio de 53.0 % y un límite elástico promedio de 304 MPa. El material de partida también tenía un porcentaje en volumen de fases magnéticas de 0.9 % Fe.

## ES 2 933 436 T3

La banda caliente fue sometida a granallado para retirar el óxido y cargada en un horno de convección mecánica Yamato DKN810 durante al menos 30 minutos antes de laminar para permitir que la placa alcanzara la temperatura. La banda caliente fue laminada en un laminador Fenn Modelo 061 con brechas entre rodillos decrecientes constantemente, y fue cargada en el horno durante al menos 10 minutos entre pasadas para asegurar una temperatura de partida constante (es decir 50, 100, 150, 200, 250 °C, 300 °C, 350 °C, y 400 °C) para cada pasada de laminación subsecuente para una reducción total objetivo de 20 %. Las muestras fueron cortadas por EDM en la geometría estándar ASTM E8. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 5984), utilizando el software de control y análisis Bluehill de Instron. Todas las pruebas de tracción fueron ejecutadas a temperatura ambiente en control de desplazamiento con el accesorio inferior sostenido rígido y el accesorio superior en movimiento; la celda de carga está unida al accesorio superior.

Las propiedades de tracción de la aleación 2 después de la laminación a las temperaturas identificadas se enumeran en la tabla 6. Dependiendo de la temperatura de laminación, el límite elástico aumenta a un rango desde 589 a 945 MPa en comparación con los valores de 250 a 711 MPa en una banda caliente (tabla 2). La resistencia última a tracción de la aleación 2 varía desde 1132 a 1485 MPa con un alargamiento a tracción desde 21.2 a 60.5 %. Un ejemplo de curvas de estrés-deformación se muestra en la figura 15. Como se puede ver, la laminación a temperatura de 200 °C de la banda caliente desde aleación 2 demuestra la posibilidad de aumentar el límite elástico con cambios mínimos en la ductilidad y resistencia última consistente con la etapa 3a en la figura3.

El porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) fue medido después de la laminación, en el calibre de tracción al menos 10 mm desde la fractura se reporta en la tabla 7. Como se puede ver, el porcentaje en volumen de fases magnéticas después de la laminación a temperatura de 100 °C y anterior es significativamente más bajo en un rango desde 0.3 a 9.7 % Fe en comparación con el de después de laminar en frío la aleación 2 a temperatura ambiente (18.0 % Fe, tabla 4). Un aumento significativo en un porcentaje en volumen de fases magnéticas fue medido en la aleación 2 después de laminar temperatura y tracción probada (tabla 7, figura 16). Después de la prueba de tracción, el porcentaje en volumen de fases magnéticas en el calibre de tracción de las muestras varía desde 25.2 a 52.1 % Fe dependiendo de la temperatura de laminación.

Tabla 6

Propiedades de tracción de aleación 2 después de ~20 % de reducción por laminación a diferentes temperaturas				
Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico (Compensación 0.2%)	Reducción por laminación	Temperatura de laminación
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(°C)
47.4	1165	296	0	
51.5	1171	309		
60.2	1162	306		
27.5	1485	945	21.1	50
32.1	1481	942		
21.2	1468	934		
40.9	1326	819	19.4	100
36.6	1321	825		
39.5	1334	823		
51.8	1224	804	19.6	150
48.3	1219	803		
48.1	1225	809		
52.3	1205	803	20.1	200
58.0	1196	775		
53.3	1218	773		
50.6	1158	745	22.0	250

## ES 2 933 436 T3

53.0	1166	733		
53.4	1152	723		
53.2	1157	738	20.6	300
55.4	1145	752		
52.0	1157	724		
52.9	1186	691	19.8	350
56.2	1168	686		
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(°C)
57.7	1168	695		
60.5	1150	651	18.6	400
53.0	1144	621		
60.2	1158	655		

Tabla 7

Porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) como una función de temperatura de laminación antes y después de prueba de tracción de aleación 2		
Temperatura de laminación (°C)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción probado
(°C) Banda caliente	18.0	54.3
50	18.1	52.1
100	9.7	44.8
150	7.1	37.7
200	4.1	25.2
250	4.1	30.5
300	2.3	30.5
350	1.8	32.8
400	1.0	31.1

5 Este ejemplo de caso demuestra que el límite elástico en las aleaciones en este documento se puede aumentar laminando a temperaturas elevadas por lo que se reduce la transformación de fase de austenita en ferrita. Caídas significativas en Fe% se producen cuando la temperatura de laminación es superior a 100°C. Además, la laminación de la banda caliente desde las aleaciones en este documento a temperaturas de 150 °C a 400 °C demuestra la capacidad de aumentar el límite elástico (por ejemplo aumentando el límite elástico a un valor de al menos 100 MPa o más sobre el valor original) sin cambios significativos en ductilidad (es decir cambio limitado a más o menos siete y medio por ciento ( $\pm 7.5\%$  de alargamiento por tracción) y mantener la resistencia última a tracción aproximadamente al mismo nivel (es decir  $\pm 100$  MPa en comparación con el valor original).

Ejemplo de caso # 5 efecto de temperatura de laminación en límite elástico de aleación 7, aleación 18, aleación 34 y aleación 37

15 El material de partida era una banda caliente de cada una de la aleación 7, aleación 18, aleación 34, y aleación 37 con un espesor inicial de aproximadamente 2.5 mm preparado mediante laminación en caliente de una losa fundida en laboratorio de 50 mm de espesor que imitaba el procesamiento comercial. Las aleaciones 7, 18, 34, y 37 fueron procesadas en bandas calientes con un espesor de aproximadamente 2.5 mm mediante laminación en caliente a temperaturas entre 1100 °C y 1250 °C y subsecuentemente se sometieron a granallado para retirar el óxido. Las

5 propiedades de tracción de material de banda caliente fueron enumeradas previamente en la tabla 2. La banda caliente fue sometida a granallado para retirar el óxido y fue cargada en un horno de convección mecánica Yamato DKN810 durante al menos 30 minutos antes de laminar para permitir que la placa alcance la temperatura deseada. La banda caliente limpia resultante fue laminada en un laminador Fenn Modelo 061 con brechas entre rodillos decrecientes  
 10 constantemente, y fue cargada en el horno durante al menos 10 minutos entre pasadas para asegurar una temperatura constante. La banda caliente fue laminada hasta una reducción objetivo de 20 % y las muestras fueron cortadas por EDM en la geometría estándar ASTM E8. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 5984), utilizando el software de control y análisis Bluehill de Instron. Todas las pruebas de tracción fueron ejecutadas a temperatura ambiente en control de desplazamiento con el accesorio inferior sostenido rígidamente y el accesorio superior en movimiento; la celda de carga está unida al accesorio superior.

15 Las respuestas de cada aleación, en particular de su alargamiento, límite elástico, y resistencia última a tracción fueron monitorizadas a través de todo el rango de temperaturas investigado. Cada aleación fue probada después de laminar a temperaturas que oscilaban desde 100 °C como mínimo a 400 °C como máximo. Para la aleación 7, el alargamiento a tracción osciló desde 14.7 % a 35.5 %, la resistencia última a tracción osciló desde 1218 MPa a 1601 MPa, y el límite elástico osciló desde 557 MPa a 678 MPa a través del rango de temperatura investigado (tabla 8), con números de Fe% que oscilan desde 29.9 a 41.7 antes de la prueba de tracción, y 57.7 a 65.4 después de la prueba (tabla 9). Para la aleación 18, el alargamiento a tracción osciló desde 43.0 % a 51.9 %, la resistencia última a tracción osciló desde 1083 MPa a 1263 MPa, y el límite elástico osciló desde 772 MPa a 924 MPa desde 150 a 400 °C (tabla 10), con números de Fe% que oscilan desde 6.8 a 12.3 antes de la prueba de tracción y desde 31.5 a 39.6 después de la prueba en el rango de 150 a 400°C (tabla 11). Para la aleación 34, el alargamiento a tracción osciló desde 21.1 % a 31.1 %, la resistencia última a tracción osciló desde 1080 MPa a 1140 MPa, y el límite elástico osciló desde 869 MPa a 966 MPa en el rango de 150 a 400 °C (tabla 12), con números de Fe% que oscilan desde 0.4 a 1.0 antes de la prueba de tracción y 0.8 a 2.1 después de la prueba (tabla 13). Para la aleación 37, el alargamiento a tracción osciló desde 1.5 % a 9.0 %, la resistencia última a tracción osciló desde 1537 MPa a 1750 MPa, y el límite elástico osciló desde 1384 MPa a 1708 MPa en el rango de 150 a 400 °C (tabla 14), con números de Fe% que oscilan desde 74.5 a 84.3 antes de la prueba de tracción y 71.1 a 85.6 después de la prueba (tabla 15).

Tabla 8

Propiedades de tracción de aleación 7 después de ~20 % de reducción por laminación a diferentes temperaturas				
Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico (Compensación 0.2%)	Reducción por laminación	Temperatura de laminación
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(°C)
32.9	1396	389	0	
34.7	1425	373		
33.3	1392	382		
25.4	1575	676	20.2	100
27.9	1601	678		
26.5	1597	665		
28.1	1519	593	21.2	150
30.7	1529	586		
28.8	1503	609		
33.8	1478	557	19.3	200
31.9	1458	575		
35.1	1501	567		
31.8	1464	631	19.8	250
33.5	1491	607		
31.7	1491	583		

## ES 2 933 436 T3

35.5	1449	647	19.5	300
33.5	1462	645		
34.0	1468	647		
33.9	1468	663	19.2	350
34.5	1428	673		
30.2	1469	673		
14.7	1218	651	20.2	400
17.4	1287	648		
17.7	1270	665		

Tabla 9

Fe% antes y después de prueba de aleación 7 a diferentes temperaturas		
Temperatura de laminación (°C)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre probado
100	41.7	65.4
150	33.5	65.2
200	29.9	64.5
250	30.4	62.7
300	32.0	61.9
350	30.5	60.6
400	30.5	57.7

Tabla 10

Propiedades de tracción de aleación 18 después de ~20 % de reducción por laminación a diferentes temperaturas				
Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico (Compensación 0.2%)	Reducción por laminación	Temperatura de laminación
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
54.3	1145	415	0	
53.8	1168	401		
53.3	1167	401		
39.6	1243	911	20.4	100
37.3	1242	922		
37.6	1263	924		
46.5	1184	856	20.3	150
43.4	1155	869		
47.4	1195	859		

ES 2 933 436 T3

43.0	1142	828	20.5	200
50.5	1153	830		
47.2	1155	834		
48.6	1125	797	19.9	250
49.4	1138	808		
47.9	1118	801		
51.7	1144	812	20.3	300
49.6	1100	798		
51.9	1123	825		
50.3	1139	784	19.3	350
49.1	1127	811		
46.8	1145	812		
43.0	1083	782	20.5	400
46.6	1130	778		
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
46.5	1097	772		

Tabla 11

Fe% antes y después de prueba de aleación 18 a diferentes temperaturas		
Temperatura de laminación (°C)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre probado
100	14.9	42.7
150	12.3	39.6
200	10.2	37.3
250	9.5	36.6
300	8.7	34.7
350	7.7	33.2
400	6.8	31.5

Tabla 12

Propiedades de tracción de aleación 34 después de ~20 % de reducción por laminación a diferentes temperaturas				
Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico	Reducción por laminación	Temperatura de laminación
		(Compensación 0.2%)		
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
50.3	944	509	0	

ES 2 933 436 T3

52.7	946	524		
52.1	942	520		
20.3	1194	1031	20.5	100
20.8	1189	1039		
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
20.6	1199	1040		
25.7	1136	962	19.9	150
24.2	1140	966		
24.9	1136	961		
25.6	1120	948	20.3	200
25.4	1115	942		
24.4	1112	947		
29.8	1092	904	19.3	250
29.7	1097	911		
29.0	1099	899		
24.0	1115	945	19	300
23.8	1111	957		
24.0	1105	955		
30.7	1088	869	20.3	350
21.1	1088	913		
28.6	1081	881		
31.1	1080	877	19.8	400
29.3	1084	883		
30.7	1081	898		

Tabla 13

Fe% antes y después de prueba de aleación 34 a diferentes temperaturas		
Temperatura de laminación (°C)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre probado
100	1.5	3.5
150	1.0	2.1
200	0.9	1.6
250	0.4	0.8
300	0.4	1.0
350	0.6	1.0
400	0.5	0.8

# ES 2 933 436 T3

Tabla 14

Propiedades de tracción de aleación 37 después de ~20 % de reducción por laminación a diferentes temperaturas				
Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico (Compensación 0.2%)	Reducción por laminación	Temperatura de laminación
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
8.2	1612	998	0	
7.7	1617	1004		
7.8	1607	995		
7.4	1780	1483	20.5	100
4.8	1763	1469		
7.3	1771	1484		
8.5	1645	1420	20.1	150
8.4	1634	1384		
9.0	1642	1413		
7.5	1631	1494	20.7	200
7.4	1635	1499		
7.3	1629	1474		
6.5	1537	1481	19.4	250
6.9	1542	1484		
7.5	1546	1482		
(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(C)
4.8	1591	1561	20.2	300
5.0	1588	1558		
5.2	1596	1559		
4.1	1649	1618	20.6	350
1.5	1644	1616		
4.1	1647	1615		
3.7	1750	1706	20	400
4.1	1742	1698		
4.1	1747	1708		

Tabla 15

Fe% antes y después de prueba de aleación 37 a diferentes temperaturas		
Temperatura de laminación (°C)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
100	84.3	85.6

150	77.2	84.4
200	79.9	76.8
250	75.1	80.9
300	76.7	71.1
350	77.5	75.7
400	74.5	72.8

Las curvas representativas para cada aleación en este documento se muestran en la figura 17 hasta figura 20 con curvas de referencia de la banda caliente probada y después de laminación en frío a la misma reducción aproximada de 20 % para comparación paralela.

- 5 Este ejemplo de caso demuestra que el límite elástico en las aleaciones en este documento se puede aumentar aunque la transformación de fase de austenita en ferrita se reduce cuando se lamina a temperaturas de 100 °C o superiores hasta 400 °C. Fueron proporcionados ejemplos de cambios en límite elástico, resistencia última a tracción, y alargamiento a tracción tanto para las etapas 3a como 3b en la figura 2.

Ejemplo de caso # 6 efecto de reducción de laminación a 200 °C sobre límite elástico de aleación 2

- 10 La aleación 2 fue procesada en una banda caliente con un espesor de aproximadamente 2.5 mm desde la pieza fundida de laboratorio. Después de la laminación en caliente, la aleación 2 fue laminada a 200 °C con reducciones por laminación variables que oscilan desde aproximadamente 10 % a 40 %. Entre pasadas de laminación, el material de lámina de aleación 2 fue colocado en un horno de convección a 200 °C durante 10 minutos para mantener la temperatura. Cuando fue lograda la reducción por laminación deseada, las muestras de tracción ASTM E8 fueron cortadas a través de EDM por alambre y fueron probadas.

- 15 Las propiedades de tracción de aleación 2 después de laminación a 200 °C con diferentes reducciones por laminación (0.0 a 70.0 %) se enumeran en la tabla 16, que también incluye datos anteriores a cualquier experimento de laminación. La figura 21 muestra las curvas de tracción representativas de la aleación 2 como una función de reducción por laminación a 200 °C. Se observa que el límite elástico del material aumenta rápidamente con la reducción creciente, sin cambiar la resistencia última a tracción (es decir un cambio de más o menos 100 MPa) hasta una reducción de 30 %.
- 20 La figura 22 proporciona una comparación de las tendencias del límite elástico y resistencia última a tracción como una función de reducción por laminación a 200 °C, que muestra que, aunque el aumento de límite elástico es relativamente rápido, el cambio de resistencia última a tracción es consistente con los cambios de propiedad de etapa 3a en la figura 2 hasta 30.4 % de reducción por laminación y es consistente con los cambios de propiedad de etapa 3b a una reducción por laminación de 39.0 %.

- 25 El alargamiento total de aleación 2 se representa como una función de reducción por laminación a 200 °C en la figura 23. Demuestra que mientras el límite elástico de aleación 2 está aumentando con la reducción adicional durante la laminación a 200 °C, la ductilidad disponible no disminuye rápidamente hasta una reducción >30 %. Nótese que esto se simula usando métodos de laminación de laboratorio y laminación comercial incluyendo la laminación de laminador en tándem, laminación de laminador en Z, y laminación de laminador inverso que adicionalmente aplicarán una tensión de tira durante el laminado por lo que la cantidad exacta de reducción por la cual la ductilidad disminuye puede cambiar.

- 30 El porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) fue medido usando un Fischer Feritscope FMP30 para las muestras después de laminación a 200 °C y de nuevo después de la prueba de tracción en el calibre de tracción (es decir la sección de calibre reducido presente en el espécimen de tracción). Estas mediciones, que se muestran en la tabla 17, son indicativas de la cantidad de transformación de fase inducida por deformación que se está produciendo en la aleación durante el proceso de laminación y durante la prueba de tracción subsecuente. La cantidad de transformación de fase inducida por deformación en la aleación 2 después de las pruebas de laminación y tracción se muestra en la figura 24. Se puede ver que la transformación de fase inducida por deformación se suprime en gran medida a 200 °C, ya que el porcentaje en volumen de fases magnéticas solo aumenta ligeramente con la creciente reducción por laminación. Se ha demostrado que la laminación a 200 °C tiene un efecto sobre la transformación de fase inducida por deformación durante la prueba de tracción también, con crecientes reducciones por laminación que suprimen la cantidad de transformación en el material.

Tabla 16

Propiedades de tracción promedio de aleación 2 después de laminación a 200 °C a diversas reducciones			
Reducción por laminación	Límite elástico	Resistencia última a tracción	Alargamiento a tracción

ES 2 933 436 T3

(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
0.0	296	1165	47.4
	309	1171	51.5
	306	1162	60.2
10.7	496	1175	60.8
	556	1223	63.5
	536	1187	61.0
20.1	803	1205	52.3
	775	1196	58.0
	773	1218	53.3
30.4	986	1226	42.3
	938	1209	42.7
	979	1233	42.6
39.0	1123	1274	5.5
	1148	1290	7.2
	1147	1285	9.4
50.4*	805	1425	5.11
	1107	1445	5.17
	786	1427	3.1
60.1*	1258	1520	6.92
	1200	1520	6.93
	1216	1524	4.29
70.0*	1299	1623	6.06
	1361	1625	6.58
	1348	1626	6.14

\* Fue aplicado procesamiento diferente: aleación 2 fue procesada en banda caliente a 1250 °C con un espesor de aproximadamente 9.3 mm, subsecuentemente fue sometida a granallado para retirar el óxido y luego fue laminada a 200 °C a 4.6 mm (~50 % de reducción). Luego el material fue recocido a 850°C durante 10 minutos y laminado a 200 °C a aproximadamente 50.4, 60.1, y 70 % de reducción.

Tabla 17

Porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) como una función de reducción por laminación		
Reducción por laminación (%)	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
0.0	0.9	42.6
10.7	3.0	46.7
20.1	4.2	37.9

30.4	5.8	26.7
39.0	5.1	16.2
50.4	2.5	15.3
60.1	2.4	13.5
70.0	2.3	16.1

Este ejemplo de caso demuestra que el límite elástico de las aleaciones descritas en este documento se puede adaptar variando la reducción por laminación a temperaturas superiores al ambiente como se muestra aquí para la aleación 2 mediante laminación a 200 °C. En el contexto amplio de la presente divulgación, se contempla que el rango de temperatura esté entre 150 °C a 400 °C como se proporciona en el ejemplo de caso previo para la tabla 7. Durante esta laminación, el camino de deformación se modifica de tal manera que se está produciendo una transformación de fase inducida por deformación relativamente limitada, lo cual da como resultado la capacidad de retener una ductilidad significativa y mantener la resistencia última a tracción mientras que aumenta el límite elástico en el estado laminado en frío. De esa manera, los parámetros de la laminación se pueden optimizar para mejorar el límite elástico del material sin sacrificar la ductilidad o resistencia última a tracción.

Ejemplo de caso #7 microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C

La aleación 2 fue procesada en una banda caliente con espesor de 9 mm desde la pieza fundida de laboratorio que imitaba el procesamiento en la producción comercial de banda caliente. La banda caliente fue laminada en frío con reducción de 50 % y fue recocida a 850 °C durante 10 minutos con enfriamiento por aire que imitaba el procesamiento de laminación en frío en la producción comercial de láminas. Fue usado granallado para retirar los óxidos que se formaron durante el recocido. Luego las aleaciones fueron laminadas en frío de nuevo hasta la falla o la reducción limitada de laminador. Las muestras fueron calentadas a 200 °C en un horno de convección durante al menos 30 minutos antes de la laminación en frío para asegurar que estaban a una temperatura uniforme, y se recalentaron durante 10 minutos entre pasadas para asegurar una temperatura constante. La lámina de aleación 2 fue laminada en frío primero con reducción de 30 % y luego hasta una reducción máxima de 70 %. La microestructura de la estructura inicial y después de laminación fue estudiada mediante microscopía de electrones de barrido (SEM). Para preparar muestras de SEM, las piezas fueron cortadas por EDM y se montaron en epoxi, y se pulieron progresivamente con solución de suspensión de diamante de 9 µm, 6 µm y 1 µm, y finalmente con sílice de 0.02 µm.

La figura 25 muestra las imágenes de SEM retrodispersadas de la microestructura antes de la laminación en frío que es principalmente austenítico con maclas de recocido dentro de granos en tamaño de micrones. Después de la laminación en frío con reducción de 30 %, como se muestra en la figura 26, se puede ver una estructura de bandas en diferentes áreas con diferentes orientaciones. Presumiblemente, las bandas con orientación similar son maclas de deformación en un grano austenítico mientras que las bandas en direcciones diferentes son maclas en otro grano de orientación de cristal. Se puede observar algún refinamiento de grano en áreas seleccionadas.

Después de que se aumenta la reducción por laminación a 70 %, las bandas ya no son visibles, y se puede ver la estructura refinada a través del volumen (figura 27). Como se muestra en la imagen de alto aumento en la figura 27b, se pueden discernir islas finas con un tamaño mucho más pequeño que 10 µm. Considerando la alta deformación ejercida en la austenita estable durante el proceso de laminación, la austenita podría refinarse drásticamente típicamente en el rango de 100 a 500 nm. Las mediciones de Feritscope sugieren que la austenita es estable a 200 °C con casi 100% de austenita mantenida después de laminación.

Este ejemplo de caso demuestra la estabilización de austenita (es decir la resistencia a transformación en ferrita) en aleaciones en este documento durante la laminación a 200 °C incluso con una alta reducción por laminación de 70 % y refinamiento microestructural de la austenita en contraste con la laminación en frío cuando el refinamiento se produce a través de la transformación de la austenita a ferrita.

Ejemplo de caso # 8 efecto de reducción por laminación a 200 °C en microestructura de aleación 2

La laminación a temperatura dio como resultado un aumento significativo en el límite elástico de la aleación 2 mientras que fue mantenido un alto alargamiento a tracción. Fue realizado un estudio de TEM en la aleación 2 laminada a 200 °C para analizar los cambios estructurales durante la laminación a 200 °C como una función de la deformación por laminación. En este ejemplo de caso, primero fue laminada en caliente una losa fundida en laboratorio de 50 mm de espesor, y luego la banda caliente resultante fue laminada a 200°C a diferentes deformaciones. Para mostrar la evolución estructural, las microestructuras de las láminas laminadas fueron estudiadas mediante microscopía de electrones de transmisión (TEM). Para preparar los especímenes de TEM, las muestras fueron cortadas desde la lámina usando EDM por alambre, y luego se diluyeron triturando con almohadillas de tamaño de grano reducido cada vez. Fue hecha una dilución adicional a muestras de 60 a 70 µm de espesor puliendo con soluciones de suspensión de diamante de 9 µm, 3 µm y 1 µm, respectivamente. Fueron perforados discos de 3 mm en diámetro a partir de las

láminas y el pulido final fue logrado mediante electropulido usando un pulidor de doble chorro. La solución química usada fue de ácido nítrico a 30 % mezclado en base de metanol. En caso de un área delgada insuficiente para la observación de TEM, los especímenes de TEM fueron molidos con iones usando un sistema de pulido de iones de precisión (PIPS) Gatan. La molienda de iones usualmente se hace a 4.5 keV, y el ángulo de inclinación se reduce desde 4° a 2° para abrir el área delgada. Los estudios de TEM fueron hechos usando un microscopio de alta resolución JEOL 2100 operado a 200 kV.

La figura 28 muestra las imágenes de TEM de campo claro de la microestructura en la aleación 2 laminada a 200 °C con reducción de 10 %. Se puede ver que los granos de austenita están llenos de dislocaciones enredadas, y se exhibe la estructura de celda de dislocación. Sin embargo, debido a la deformación por laminación relativamente baja, los límites de grano de austenita originales todavía son visibles. Se nota que la austenita es estable durante la laminación a 200 °C. La difracción de electrones sugiere que la austenita es la fase predominante que también fue consistente con la medición Feritscope. La laminación a 200 °C con reducción de 10 % aumenta el límite elástico promedio desde 303 MPa en la banda caliente a 529 MPa (véase tabla 16). Cuando la lámina se lamina a 30 %, TEM muestra cualitativamente una mayor densidad de dislocaciones en los granos, como se muestra en la figura 29, y se exhibe una clara estructura de celda de dislocación. Además, se ven algunas maclas de deformación dentro de los granos de austenita. Similar a la muestra laminada a 10 %, la fase austenita se mantiene, como se confirma por la difracción de electrones. Sin embargo, los límites de grano originales de austenita ya no son visibles. La laminación a 200 °C con reducción de 30 % da como resultado un límite elástico promedio de 968 MPa (tabla 16). Después de laminar con reducción de 70 % (figura 30), se puede ver una densidad de dislocaciones cualitativamente más alta continúa a partir de TEM, y las celdas de dislocación son similares a las de la muestra laminada a 30 % (figura 29). Además, las maclas de deformación también están presentes en la muestra. Similar a la muestra laminada a 30%, la austenita todavía permanece estable durante la laminación que se verifica por difracción de electrones.

Este ejemplo de caso demuestra que las aleaciones en este documento mantienen la estructura de austenita durante la laminación a 200 °C con una reducción de hasta 70 %. Los cambios estructurales incluyendo formación de celdas de dislocación y maclado llevan a un aumento en el límite elástico después de laminación a 200 °C.

#### Ejemplo de caso #9 ruta de proceso por combinación de métodos de laminación

Las aleaciones 2, aleación 7, aleación 18, y aleación 34 fueron procesadas en una banda caliente con un espesor de ~2.7 mm, fueron sometidas a granallado para retirar el óxido y laminadas a 200 °C hasta una reducción de 20 %. El material fue seleccionado y luego laminado en un rango de reducciones a temperatura ambiente. Las muestras de tracción ASTM E8 fueron cortadas mediante EDM por alambre y probadas en un marco Instron 5984 usando el software Bluehill de Instron.

Las propiedades de tracción de las aleaciones seleccionadas después de laminación combinada se enumeran en la tabla 18 hasta tabla 21. Fue observado un aumento significativo en el límite elástico después de la combinación de métodos de laminación en las tres aleaciones en comparación con el estado de banda caliente o justo después de laminación con una reducción de ~20 % en espesor de laminación a 200 °C y subsecuente reducción por laminación a temperatura ambiente. El límite elástico hasta 1216 MPa registrado para la aleación 2 (límite elástico en banda caliente es 309 MPa y 803 MPa después de laminación a 200 °C), hasta 1571 MPa en aleación 7 (límite elástico en banda caliente es 333 MPa y 575 MPa después de laminación a 200 °C), hasta 1080 MPa en aleación 18 (límite elástico en banda caliente es 390 MPa y 834 MPa después de laminación a 200 °C), y hasta 1248 MPa en aleación 34 (límite elástico en banda caliente es 970 MPa y 1120 MPa después de laminación a 200 °C). La figura 31 hasta figura 34 muestran las curvas de tracción correspondientes para las aleaciones 2, 7, 18, y 34, respectivamente. También fue observado un aumento en la resistencia última a tracción después de laminación en frío en todas las aleaciones en este documento con una disminución en alargamiento a tracción (véanse tablas 18 hasta 21). El análisis del porcentaje en volumen de fases magnéticas de las aleaciones seleccionadas en este documento en cada condición examinada, tanto antes como después de la prueba de tracción se enumera en la tabla 22 hasta tabla 25. La laminación en frío lleva a un % Fe más alto en la lámina procesada desde las aleaciones en este documento seguido de aumento adicional en % Fe debido a la transformación que se produce durante la prueba de tracción.

Tabla 18 propiedades de tracción de aleación 2 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico
		(%)	(MPa)	(MPa)
Banda caliente Hot Band		47.4	1165	296
		51.5	1171	309
		60.2	1162	306
20.1	-	52.3	1205	803

ES 2 933 436 T3

20.1	-	58.0	1196	775
20.1	-	53.3	1218	773
19.2	4.4	36.1	1298	951
19.2	4.4	39.0	1303	974
19.2	4.4	37.4	1275	944
20.0	10.2	35.1	1386	994
20.0	10.2	31.8	1393	1018
20.0	10.2	34.0	1409	999
20.0	19.8	19.2	1544	1064
20.0	19.8	23.1	1542	1079
20.0	19.8	18.5	1541	1068
20.0	30.7	21.3	1662	1199
20.0	30.7	15.2	1665	1216
20.0	30.7	20.3	1672	1212

Tabla 19 propiedades de tracción de aleación 7 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico
		(%)	(MPa)	(MPa)
Banda caliente		28.1	1508	333
		28.5	1516	331
		26.0	1520	317
19.3	-	33.8	1478	557
19.3	-	31.9	1458	575
19.3	-	35.1	1501	567
19.3	5	27.4	1598	625
19.3	5	26.1	1619	608
19.3	5	27.4	1629	597
19.3	10.7	23.4	1689	795
19.3	10.7	20.4	1710	774
19.3	10.7	21.7	1737	778
19.3	19.9	15.1	1817	1199
19.3	19.9	16.3	1802	1217
19.3	19.9	16.5	1838	1265
19.3	29.7	12.0	1872	1510
19.3	29.7	14.4	1907	1492

ES 2 933 436 T3

19.3	29.7	13.1	1920	1571
------	------	------	------	------

Tabla 20 Propiedades de tracción de aleación 18 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico
		(%)	(MPa)	(MPa)
Banda caliente		58.8	1224	384
		56.1	1245	390
		50.7	1190	365
20.5	-	43.0	1142	828
20.5	-	50.5	1153	830
20.5	-	47.2	1155	834
20.5	4.9	35.7	1244	846
20.5	4.9	37.5	1243	856
20.5	4.9	34.8	1251	769
20.5	10.3	30.7	1339	830
20.5	10.3	31.6	1340	905
20.5	10.3	26.6	1337	819
20.5	19.3	22.4	1529	1025
20.5	19.3	22.3	1523	898
20.5	19.3	22.0	1521	885
20.6	29.4	17.0	1625	1008
20.6	29.4	17.3	1641	1080
20.6	29.4	18.8	1622	1074

Tabla 21 propiedades de tracción de aleación 34 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Alargamiento a tracción	Resistencia última a tracción	Límite elástico
		(%)	(MPa)	(MPa)
Banda caliente		65.9	963	515
		58.7	954	485
		62.1	970	545
20.3	-	25.6	1120	948
20.3	-	25.4	1115	942
20.3	-	24.4	1112	947
19.7	5.9	18.2	1173	1037

19.7	5.9	18.8	1163	1020
19.7	5.9	19.3	1162	1005
19.7	11	12.4	1247	866
19.7	11	11.9	1243	1028
19.7	11	12.2	1248	1055

Tabla 22 porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) en aleación 2 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
(%)	(%)	(Fe%)	(Fe%)
0.0	0.0	0.9	42.6
20.1	0.0	4.2	37.6
19.2	4.4	3.6	34.0
20.0	10.2	6.1	40.0
20.0	19.8	11.6	44.9
20.0	30.7	16.8	49.3

5 Tabla 23 porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) en aleación 7 después de combinación de métodos de laminación

Reducción por laminación a 200 °C	Reducción en laminación en frío	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
(%)	(%)	(Fe%)	(Fe%)
0	0	10.4	63.6
19.3	0	29.9	64.5
19.3	5.0	33.8	64.9
19.3	10.7	44.0	66.2
19.3	19.9	56.4	67.9
19.3	29.7	59.8	67.3

Tabla 24 porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) en aleación 18 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
(%)	(%)	(Fe%)	(Fe%)
0.0	0.0	0.3	48.6
20.5	0.0	10.2	37.3
20.5	4.9	9.9	38.5

20.5	10.3	14.4	42.0
20.5	19.3	23.0	48.2
20.6	29.4	32.5	49.2

Tabla 25 Porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) en aleación 34 después de combinación de métodos de laminación

Primera reducción por laminación a 200 °C	Segunda reducción por laminación en frío	Fe% después de laminación	Fe% en calibre de tracción
(%)	(%)	(Fe%)	(Fe%)
0.0	0.0	0.3	2.2
20.3	0.0	0.9	1.6
19.7	5.9	1.1	1.6
19.7	11.0	1.4	2.9
19.7	19.7	1.8	2.7
19.7	29.7	2.0	2.7

- 5 Este ejemplo de caso demuestra un camino para crear un tercer conjunto distinto de combinaciones de propiedades, que se puede lograr procesando la aleación en una lámina con un espesor de 0.5 mm a 5.0 mm, seguido de deformar (laminar) y reducir el espesor en una pasada en una temperatura en el rango de 150 °C a 400 °C, y luego subsiguientes reducciones en el espesor a temperaturas ≤ 150 °C de temperatura. Se observa que esto proporciona un límite elástico relativamente mayor en comparación con solamente laminación en frío, y mayores resistencias a tracción en comparación con solamente laminación a temperatura.

Ejemplo de caso # 10 métodos de ejemplo para adaptar combinaciones de propiedades

- 15 Una banda caliente desde aleación 2 fue procesada en una lámina por diferentes métodos en este documento hacia un mayor límite elástico y combinación de propiedades de acuerdo con las etapas proporcionadas en la figura 2 y figura. 3. La aleación 2 fue fundida primero y luego fue procesada en una lámina a través de laminación en caliente que era desde 2.5 a 2.7 mm de espesor. Para la comparación de tracción, el material de banda caliente de referencia fue laminado en caliente a ~1.8 mm para reducir el calibre antes de la prueba. Para el ejemplo de figura 2 (es decir laminada en 20 % a 200 °C), la banda caliente fue laminada con una reducción de 20 % a 200 °C. Antes de la laminación, fue calentada hasta 200 °C durante 30 minutos antes de ser laminada a 20% a 200 °C con un recalentamiento de 10 minutos entre pasadas de laminación para mantener la temperatura. Para el ejemplo de figura 20 3 (es decir laminada en 20 % a 200 °C y luego laminación en frío de 10 % a temperatura ambiente), fueron repetidas las etapas de proceso que incluían una reducción de 20 % a 200 °C y con la etapa adicional de una reducción por laminación a temperatura ambiente de 10 % aplicada. Fueron cortados especímenes de tracción desde la lámina procesada por cada método usando EDM por alambre. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 5984), usando el software de control y análisis Bluehill de Instron. Todas las pruebas 25 fueron ejecutadas a temperatura ambiente en control de desplazamiento.

- Las curvas de estrés-deformación representativas con la combinación de propiedades lograda en cada método de procesamiento cerca del óptimo se muestran en la figura 35. Como se puede ver, el límite elástico se puede aumentar significativamente (es decir aumento de 469 MPa) laminando a 200 °C con un cambio mínimo en la resistencia última a tracción de aleación (es decir aumento de 34 MPa) y alargamiento (es decir disminución de 1.8 %). Esto se proporciona por la condición de ejemplo 3a en la figura 2. Para la muestra adicionalmente laminada a 10% a temperatura ambiente desde la condición de partida de la etapa 3, entonces esto cumpliría la etapa 4 en la figura 3. Como se puede ver, en este caso, esta es una ruta hacia un mayor límite elástico (es decir aumento de 688 MPa) y resistencia a tracción (es decir aumento de 224 MPa) pero viene con una reducción en alargamiento total (es decir disminución de 25.1 %). Nótese que cumplir la etapa 4 en la figura 3 también podría hacerse por ejemplo estampando en frío la parte mediante diversos procesos mediante los cuales las áreas en la parte estampada experimentarían un mayor límite elástico y resistencia a tracción con una ductilidad proporcional menor que fue usada parcialmente en la formación de la parte.

Este ejemplo de caso demuestra un logro de alto límite elástico en las aleaciones en este documento mediante diversos métodos o su combinación que proporciona una variedad de las combinaciones de resistencia/alargamiento en la lámina resultante desde las aleaciones en este documento.

Ejemplo de caso #11 efecto de temperatura de prueba en propiedades de tracción de aleación 2

5 La aleación 2 fue producida en una forma de lámina con espesor de 1.4 mm a partir de la losa mediante laminación en caliente y laminación en frío hasta un espesor objetivo con recocido subsecuente. Los especímenes de tracción fueron cortados desde la lámina de aleación 2 usando EDM por alambre. Las propiedades de tracción fueron medidas a diferentes temperaturas en un rango desde -40 °C a 200 °C.

10 Las propiedades de tracción de la lámina de aleación 2 a diferentes temperaturas se enumeran en la tabla 26. El porcentaje en volumen de fases magnéticas fue medido en el calibre de muestra de tracción después de la prueba a cada temperatura usando Feriscope que también se enumera en la tabla 26. Como se puede ver, el límite elástico y resistencia última a tracción están disminuyendo con la temperatura de prueba creciente mientras que el alargamiento a tracción está aumentando. El alargamiento a tracción y porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) como una función de temperatura de prueba se representan en la figura 36 que muestra que a pesar de un mayor alargamiento a temperaturas elevadas, el porcentaje en volumen de fases magnéticas en un calibre de muestra de tracción después de la prueba cae significativamente y se acerca a cero después de la prueba a 200 °C. Una disminución en el porcentaje en volumen de fases magnéticas en un calibre de muestra de tracción después de la prueba indica una mayor estabilidad de austenita a temperaturas elevadas lo que suprime su transformación en ferrita bajo el estrés.

20 Tabla 26 propiedades de tracción de aleación 2 probada a diferentes temperaturas

Temperatura de prueba	Resistencia última a tracción	Límite elástico	Alargamiento a tracción	Porcentaje en volumen de fases magnéticas
(°C)	(MPa)	(MPa)	(%)	(Fe%)
-40	1240	358	59	56.3
	1180	345	46	52.7
	1180	340	57	58.0
	1190	338	46	53.8
	1120	364	31	45.1
23	1210	370	62	48.7
	1220	355	62	49.3
	1220	371	57	47.0
	1230	362	56	48.4
	1210	353	56	50.6
	1230	376	56	46.6
	1230	369	54	48.6
	1200	361	52	49.2
	1200	359	56	47.9
1200	364	62	49.4	
100	890	329	66	10.0
	905	333	71	10.8
	900	332	67	11.0
	905	342	66	9.7
	905	334	60	11.1

200	685	226	67	0.5
	690	230	66	0.6
	695	224	71	0.6
	695	217	64	0.7
	710	228	66	0.6

5 Este ejemplo de caso demuestra que la aleación multicomponente de las aleaciones en este documento dio como resultado un aumento significativo de estabilidad de austenita y se muestra que la transformación en ferrita durante la laminación se suprime a temperaturas elevadas en comparación con la laminación en frío como se proporciona claramente en la última columna en la tabla 26. Proporciona mayor ductilidad durante la propia laminación y mayor capacidad de formación en las operaciones subsiguientes de formación de láminas tales como estampado, estirado, etc.

Ejemplo de caso # 12 reducción en etapas de procesamiento hacia calibre objetivo

10 La aleación 2 fue procesada en una banda caliente con un espesor de 4.4 mm. Luego fueron laminadas dos secciones de la banda caliente, una a temperatura ambiente y otra a 200°C. La placa a 200°C fue calentada en un horno de convección mecánica durante 30 minutos antes de la laminación y recalentada durante 10 minutos entre pasadas para asegurar una temperatura constante.

15 En un caso de laminación a temperatura ambiente, la falla se produjo con una reducción de aproximadamente 42 % mientras que fue aplicada una reducción de más de 70 % durante la laminación a 200 °C sin la falla cuando se alcanzó el límite del laminador. Las limitaciones de laminador se produjeron cuando el laminador Fenn modelo 061 ya no pudo hacer reducciones significativas por pasada durante la laminación en frío mientras el material todavía tiene la capacidad de una reducción por laminación adicional.

20 El porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) fue medido mediante Feritscope a diferentes niveles de reducciones durante la laminación en frío y laminación a 200 °C. Los datos se muestran en la figura 37. Como se puede ver, el porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) aumenta rápidamente con la reducción a temperatura ambiente lo que lleva al límite de material para laminación en ~ 42 %. En un caso de la laminación a 200 °C, el porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) permanece por debajo de 3 % Fe incluso con una reducción máxima por laminación de > 70 %.

25 Fue producida una lámina desde la aleación 2 con espesor final de 1.2 mm utilizando tanto laminación en frío como laminación a 200°C. En un caso de laminación en frío, la laminación funcionó en ciclos con un recocido intermedio para restaurar la ductilidad de aleación y lograr el espesor objetivo con reducción de 29 % en la etapa final de laminación. Las muestras de tracción fueron cortadas por EDM desde la lámina con un espesor de 1.2 mm producida por ambos métodos de laminación y se recoció a 1000 °C durante 135 segundos. Las propiedades de tracción fueron medidas en un marco de prueba mecánico Instron (Modelo 3369), utilizando el software de control y análisis Bluehill de Instron. Todas las pruebas fueron ejecutadas a temperatura ambiente en control de desplazamiento con el accesorio inferior sostenido rígido y el accesorio superior en movimiento; la celda de carga está unida al accesorio superior.

35 Ejemplos de las curvas de estrés-deformación de ingeniería para la lámina recocida producida tanto por laminación en frío como por laminación a 200°C se muestran en la figura 38. Como se puede ver, a pesar de los diferentes métodos de laminación hacia el espesor objetivo, las propiedades finales de la lámina después del recocido son similares.

40 Este ejemplo de caso demuestra que la laminación donde la austenita es estable y no se transfiere a ferrita como se demuestra aquí para la aleación 2 a 200 °C, mejora significativamente la capacidad de laminación de las aleaciones en este documento lo que permitirá la reducción en etapas de procesamiento hacia calibres de lámina objetivo. De este modo, esta laminación a temperatura elevada se puede usar para alcanzar un calibre objetivo casi final con una alta reducción por laminación en frío como se proporciona en este ejemplo de > 70 %. Este material de calibre casi final entonces se puede recocer para restaurar las propiedades de partida (es decir la condición inicial). Subsecuentemente, el calibre objetivo final se puede obtener laminando en el rango de temperatura proporcionado en esta aplicación desde 150 a 400°C siguiendo las etapas y procedimientos en la figura 2 o figura. 3.

45 Ejemplo de caso # 13 Cambio en reducción por laminación limitante

La banda caliente fue preparada desde la aleación 2 con un espesor de aproximadamente 9 mm. Fue calentada a 200 a 250 °C durante 60 minutos y fue laminada hasta aproximadamente 4.5 mm con recalentamientos de 10 minutos entre pasadas de laminación para asegurar una temperatura constante. Una vez a 4.5 mm, se seccionó y recoció a

- 850 °C durante 10 minutos y se dejó enfriar al aire. El material fue sometido a granallado para retirar el óxido y fue calentado a la temperatura deseada durante al menos 30 minutos antes de la laminación, y recalentado durante 10 minutos entre pasadas para asegurar una temperatura constante. El material fue laminado hasta la falla (agrietamiento visible) caracterizada por tales grietas visibles que se propagan desde los extremos de la lámina al menos 2 pulgadas.
- 5 En una reducción de alrededor de 70 % el laminador tuvo dificultades para alcanzar las cargas necesarias para reducir el material y se detuvo la laminación, esto es una limitación de equipo y no una limitación de material. El material de control para la laminación a temperatura ambiente fue una banda caliente de 4.4 mm de espesor que fue laminada a temperatura ambiente hasta la falla. Los resultados de la reducción máxima de laminación como una función de temperatura de laminación se proporcionan en la tabla 27 y figura 39.
- 10 Este ejemplo de caso demuestra para las aleaciones en este documento que la reducción por laminación limitante aumenta a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto se puede ver que las aleaciones en este documento están contempladas para permitir una deformación permanente con una reducción en espesor de más de 20 % antes de la falla cuando se calientan a una temperatura que cae en el rango de 150 °C a 400 °C. Más preferiblemente, las aleaciones en este documento son de tal manera que se contempla que son capaces de deformación permanente con una reducción en espesor de más de 40% antes de la falla cuando se calientan en tal rango de temperatura. Esto
- 15 proporciona una deformación potencial mucho mayor para las operaciones de laminación, incluyendo procesamiento de material industrial para alcanzar un calibre objetivo. Mayores reducciones antes del agrietamiento significan que se pueden requerir menos etapas (es decir laminación en frío y recocido de recristalización) para alcanzar un calibre objetivo específico durante la producción de acero. Adicionalmente, la mayor capacidad de formación demostrada a temperaturas elevadas sería beneficiosa en la fabricación de partes a partir de una variedad de operaciones de formación que incluyen, estampado, formación por laminación, estirado, hidroformación, etc.
- 20

Tabla 27 límite de reducción por laminación vs temperatura de laminación para aleación 2

Temperatura (°C)	Límite de reducción por laminación
23	41.4%
100	53.8%
150	68.6%
200	>70%
250	>70%

## REIVINDICACIONES

1. Un método para aumentar límite elástico en una aleación metálica que comprende:
- 5 a. suministrar una aleación de metal que consiste en al menos 70 % atómico de hierro y al menos cuatro elementos seleccionados a partir de Si, Mn, Cr, Ni, Cu o C e impurezas inevitables, fundir dicha aleación, enfriar a una tasa de  $10^{-4}$  K/seg a  $10^3$  K/seg y solidificar hasta un espesor de >5.0 mm a 500 mm, en donde:
- cuando Si está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 6.13 % atómico;
- cuando Mn está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 15.17 % atómico;
- 10 cuando Cr está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 8.64 % atómico;
- cuando Ni está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 9.94 % atómico;
- cuando Cu está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 1.86 % atómico; y
- cuando C está presente en dicha aleación, está presente en una cantidad que oscila desde más de 0 a 3.68 % atómico;
- 15 b. procesar dicha aleación en una primera lámina con espesor desde 0.5 a 5.0 mm teniendo la primera lámina un alargamiento total de  $X_1$  (%), una resistencia última a tracción de  $Y_1$  (MPa), y un límite elástico de  $Z_1$  (MPa), en donde  $X_1$  es desde 10.0 a 70.0 %,  $Y_1$  es desde 900 a 2050 MPa, y  $Z_1$  es desde 200 a 750 MPa;
- c. deformar permanentemente dicha primera lámina a una temperatura que oscila desde 150 °C a 400 °C al reducir el espesor de la primera lámina para producir una segunda lámina con una de las siguientes combinaciones de propiedades de tracción A o B:
- 20
- A.
- (1) alargamiento total  $X_2 = X_1 \pm 7.5\%$ ;
- (2) resistencia última a tracción  $Y_2 = Y_1 \pm 100$  MPa; y
- (3) límite elástico  $Z_2 > Z_1 + 100$  MPa.
- 25 B.
- (1) resistencia última a tracción  $Y_3 = Y_1 \pm 100$  MPa; y
- (2) límite elástico  $Z_3 > Z_1 + 200$  MPa.
2. El método de la reivindicación 1, en donde dicha aleación consiste en al menos 70 % atómico de hierro y Si, Mn, Cr, Ni, Cu y C, e impurezas inevitables, en donde:
- 30 Si está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 6.13 % atómico;
- Mn está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 15.17 % atómico;
- Cr está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 8.64 % atómico;
- Ni está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 9.94 % atómico;
- Cu está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 1.86 % atómico; y
- 35 C está presente en dicha aleación en una cantidad que oscila desde más de 0 a 3.68 % atómico.
3. El método de la reivindicación 1, en donde dicha segunda lámina exhibe una combinación de propiedades de tracción A, y dicha combinación de propiedades de tracción A es como sigue:  $X_2 = 2.5$  % a 77.5 %,  $Y_2 = 800$  MPa a 2150 MPa, y  $Z_2 > 300$  MPa.
4. El método de la reivindicación 1, en donde dicha segunda lámina exhibe una combinación de propiedades de tracción B, y dicha combinación de propiedades de tracción B es como sigue:  $Y_3 = 800$  MPa a 2150 MPa, y  $Z_3 > 300$  MPa.
- 40
5. El método de la reivindicación 1, en donde en la etapa (c) la primera lámina se deforma permanentemente con una reducción en espesor de más de 20 % antes de la falla.

6. El método de la reivindicación 1, en donde en la etapa (c), dicha primera lámina se deforma permanentemente en dicha segunda lámina mediante formación por laminación, estampado de metal, estirado de metal, o hidroformación.
7. El método de la reivindicación 1, en donde después de la etapa (a), dicha aleación contiene más de 10 por ciento en volumen de austenita.
- 5 8. El método de la reivindicación 1 que comprende además después de la etapa (c):
- (d) deformar permanentemente la segunda lámina a una temperatura que es menor que o igual a 150 °C para formar una tercera lámina.
9. El método de la reivindicación 8, en donde la tercera lámina exhibe la siguiente combinación de propiedades de tracción:
- 10 (1) alargamiento total = 10.0 a 40.0 %;
- (2) resistencia última a tracción = 1150 a 2000 MPa;
- (3) límite elástico = 550 a 1600 MPa.
10. El método de la reivindicación 9, en donde la etapa (b) se lleva a cabo a una temperatura de 700 °C a una temperatura por debajo del punto de fusión (T<sub>m</sub>) de dicha aleación.
- 15 11. El método de la reivindicación 9, en donde después de la etapa (b) la aleación se trata térmicamente a una temperatura de 650 °C hasta una temperatura por debajo del punto de fusión (T<sub>m</sub>) de la aleación.
12. El método de la reivindicación 9, en donde en la etapa (c), dicha primera lámina se deforma permanentemente en dicha segunda lámina mediante formación por laminación, estampado de metal, estirado de metal, o hidroformación.
- 20 13. El método de la reivindicación 9, que comprende además posicionar dicha tercera lámina en uno de un marco de vehículo, chasis de vehículo, o panel de vehículo.
14. El método de la reivindicación 13, que comprende además posicionar dicha tercera lámina en uno de un collar de perforación, tubo de perforación, cubierta de tubo, junta de herramientas, boca de pozo, tanque de almacenamiento de gas comprimido, coche cisterna de ferrocarril/vagón cisterna o bote de gas natural licuado.

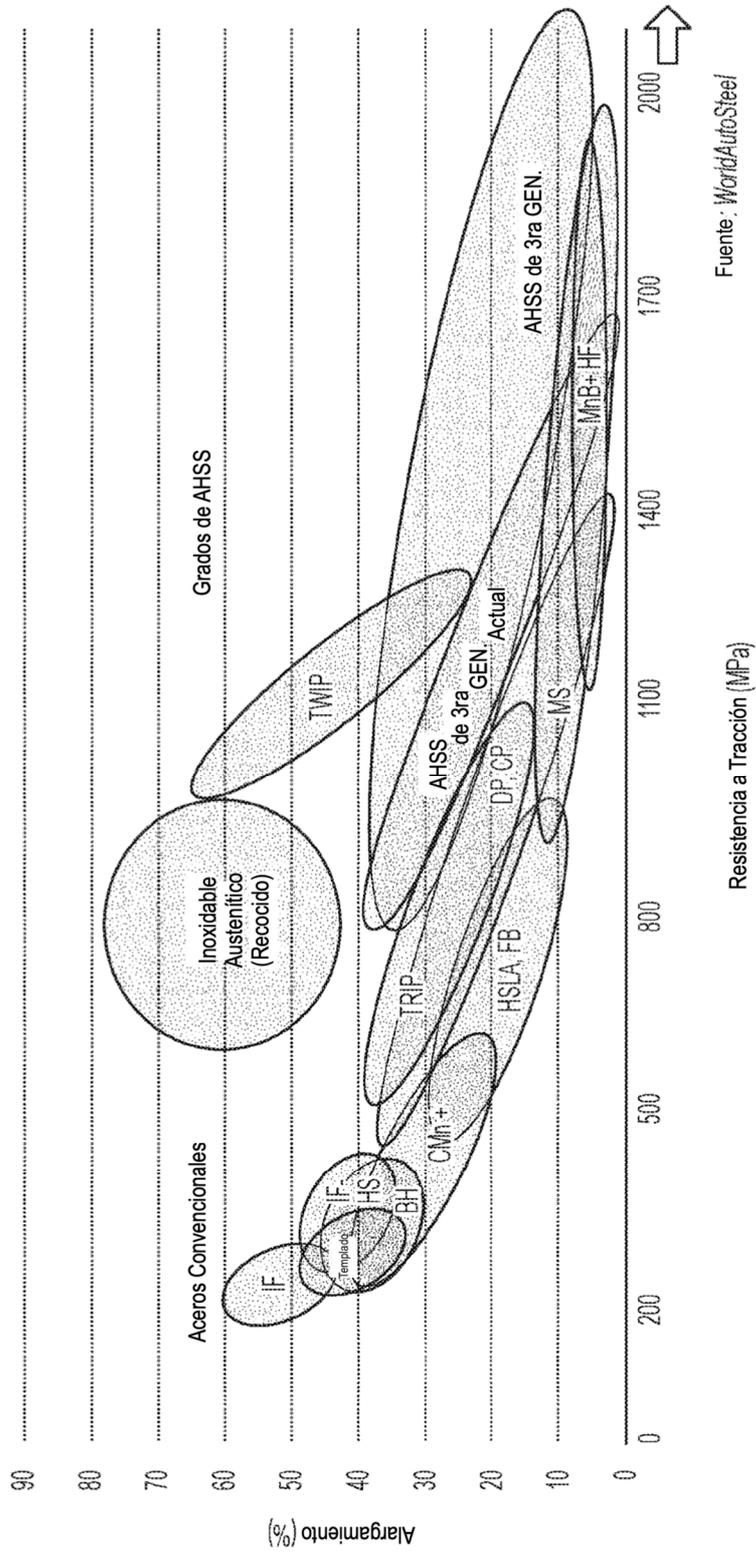


FIG. 1 "Gráfico en Banana" de World Auto Steel con propiedades objetivo para AHSS de 3ra Generación.

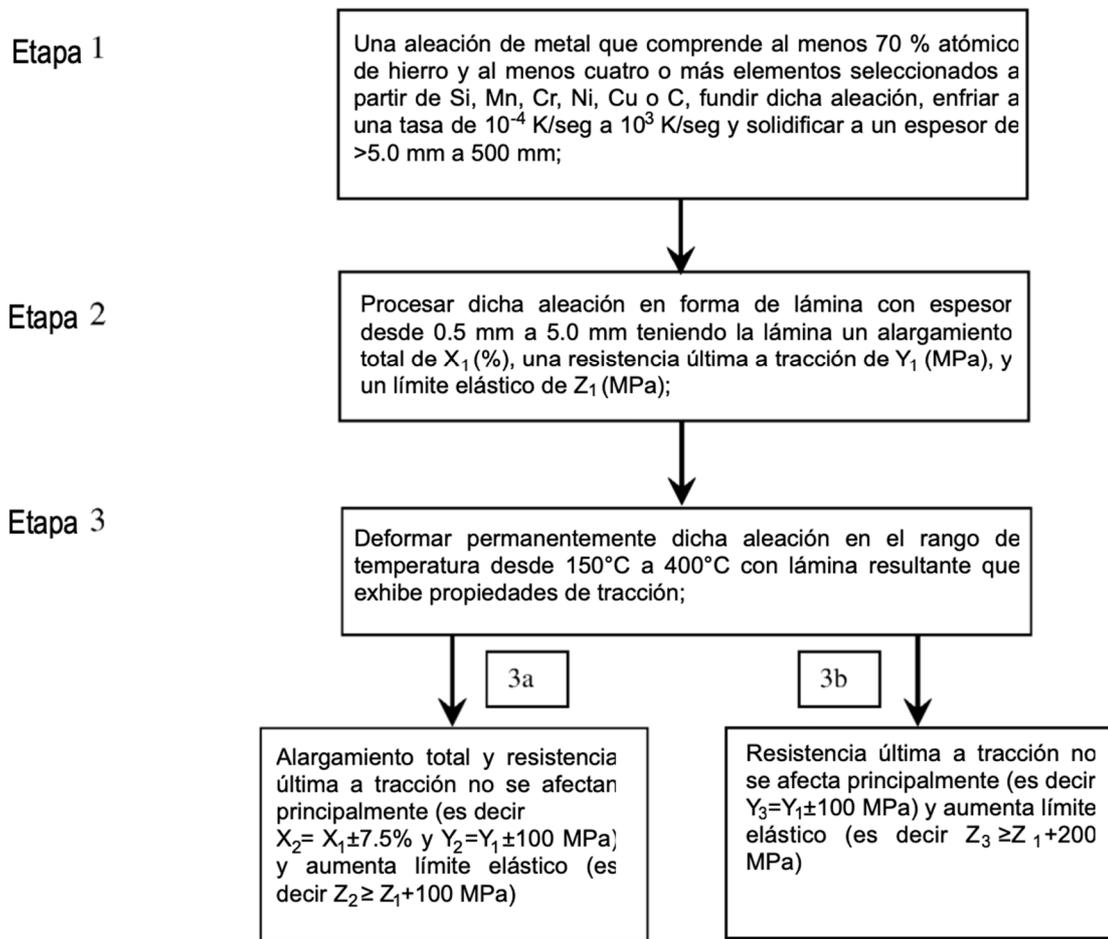


FIG. 2 Resumen de método 1 para producir alto límite elástico en aleaciones en este documento.

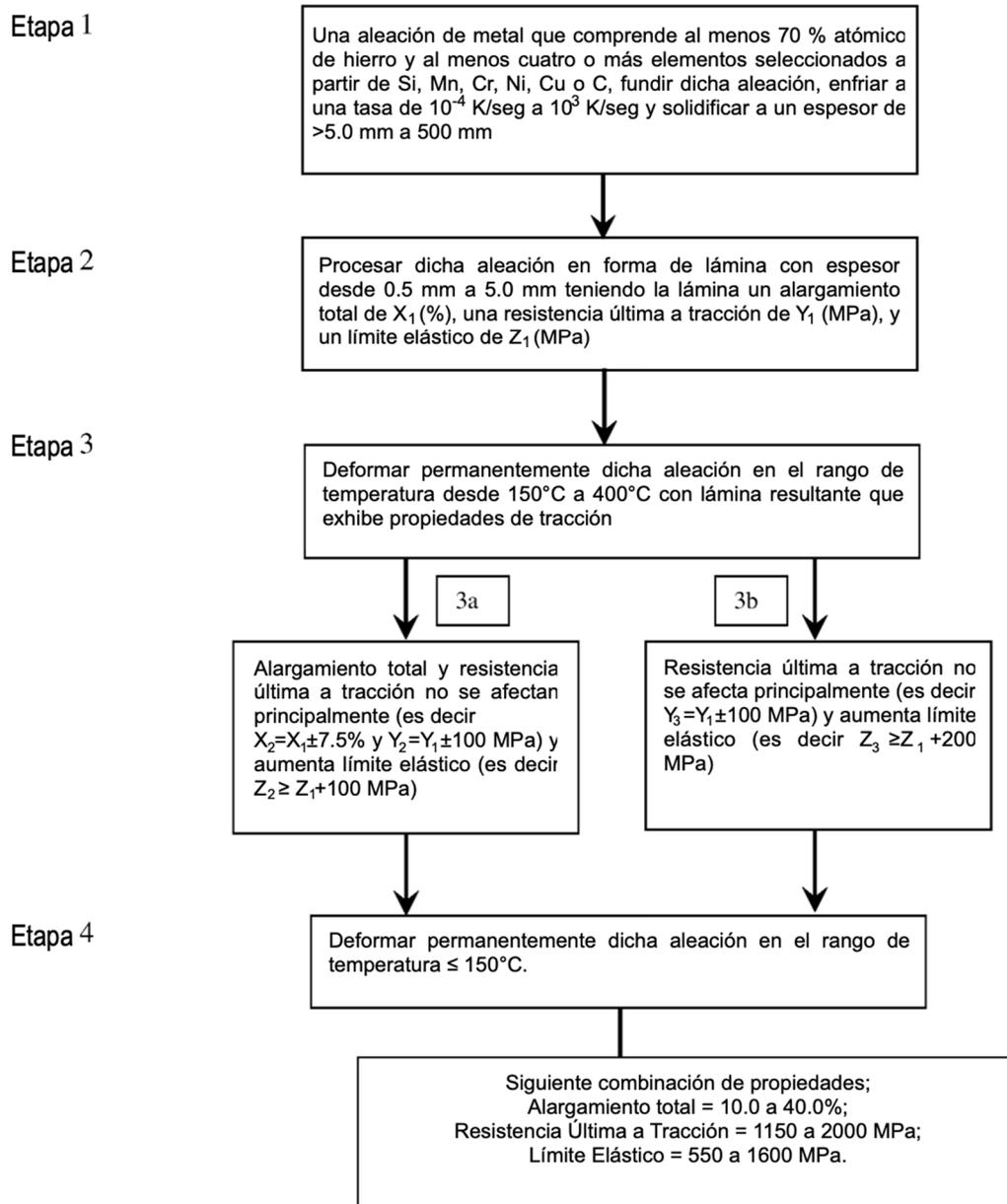


FIG. 3 Resumen de método 2 para producir alto límite elástico y combinaciones objetivo de propiedades en las aleaciones en este documento.

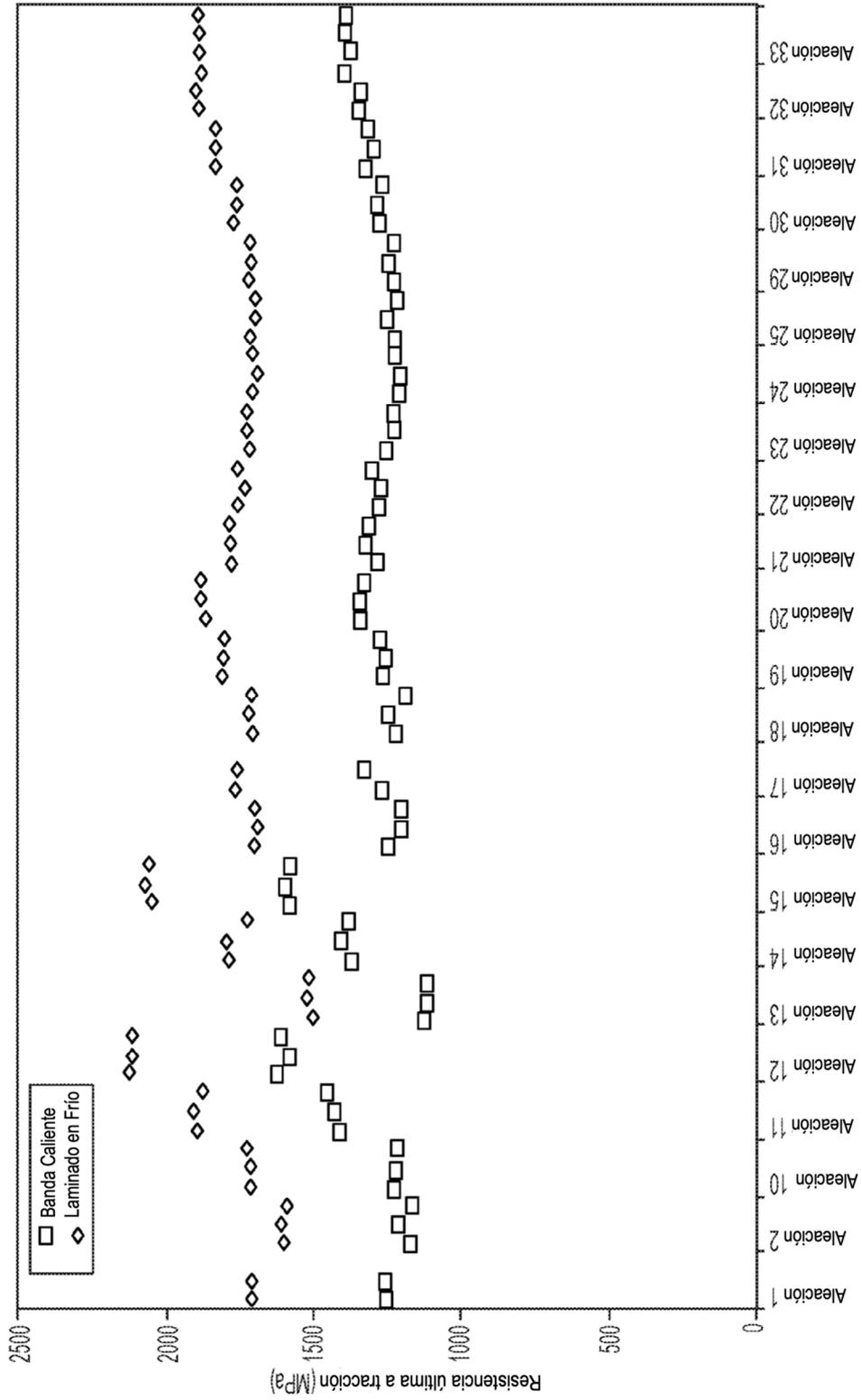


FIG. 4 Resistencia última a tracción en aleaciones en este documento antes y después de laminación en frío

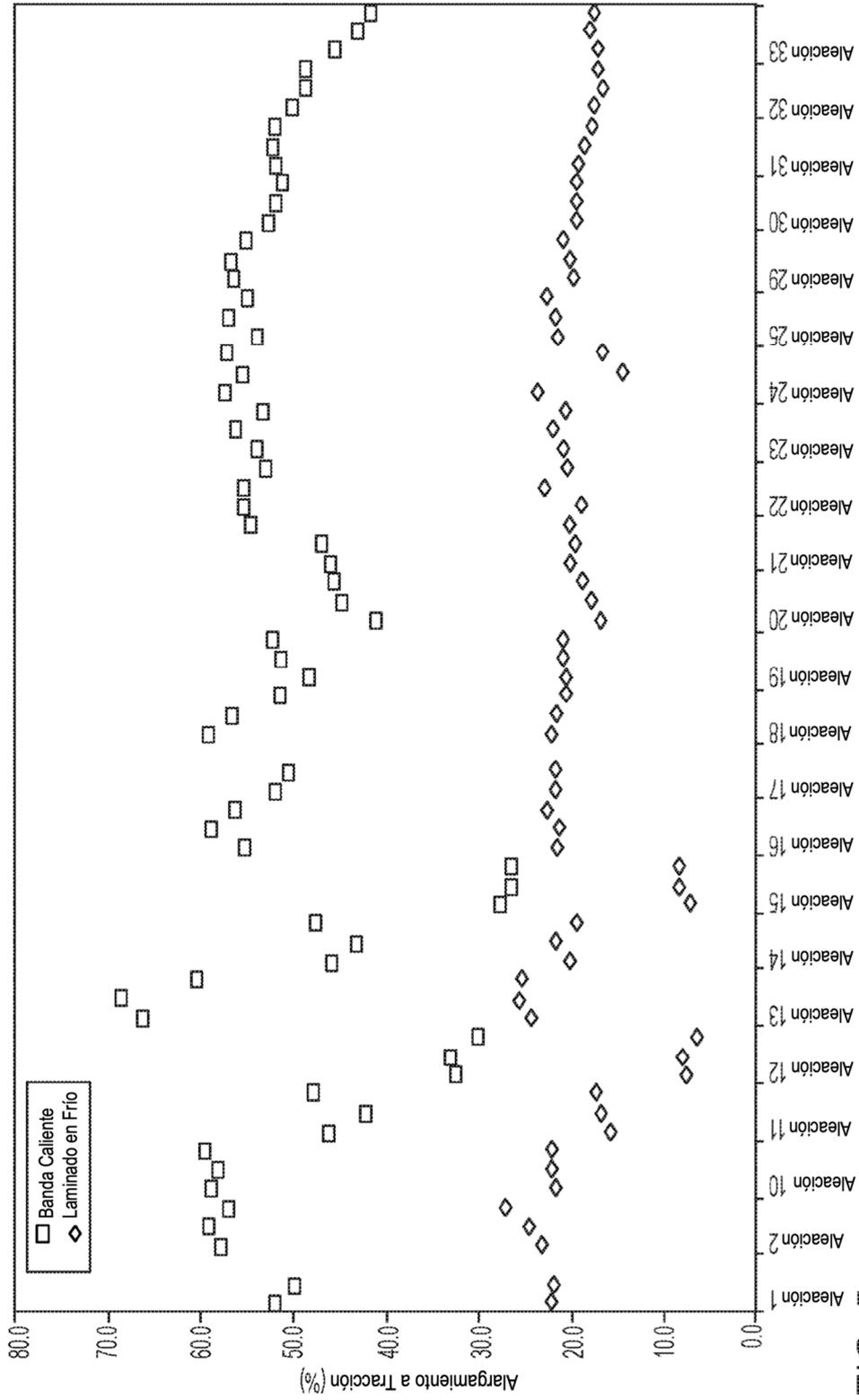


FIG. 5 Alargamiento a tracción en aleaciones en este documento antes (banda caliente) y después de laminación en frío (laminado en frío)

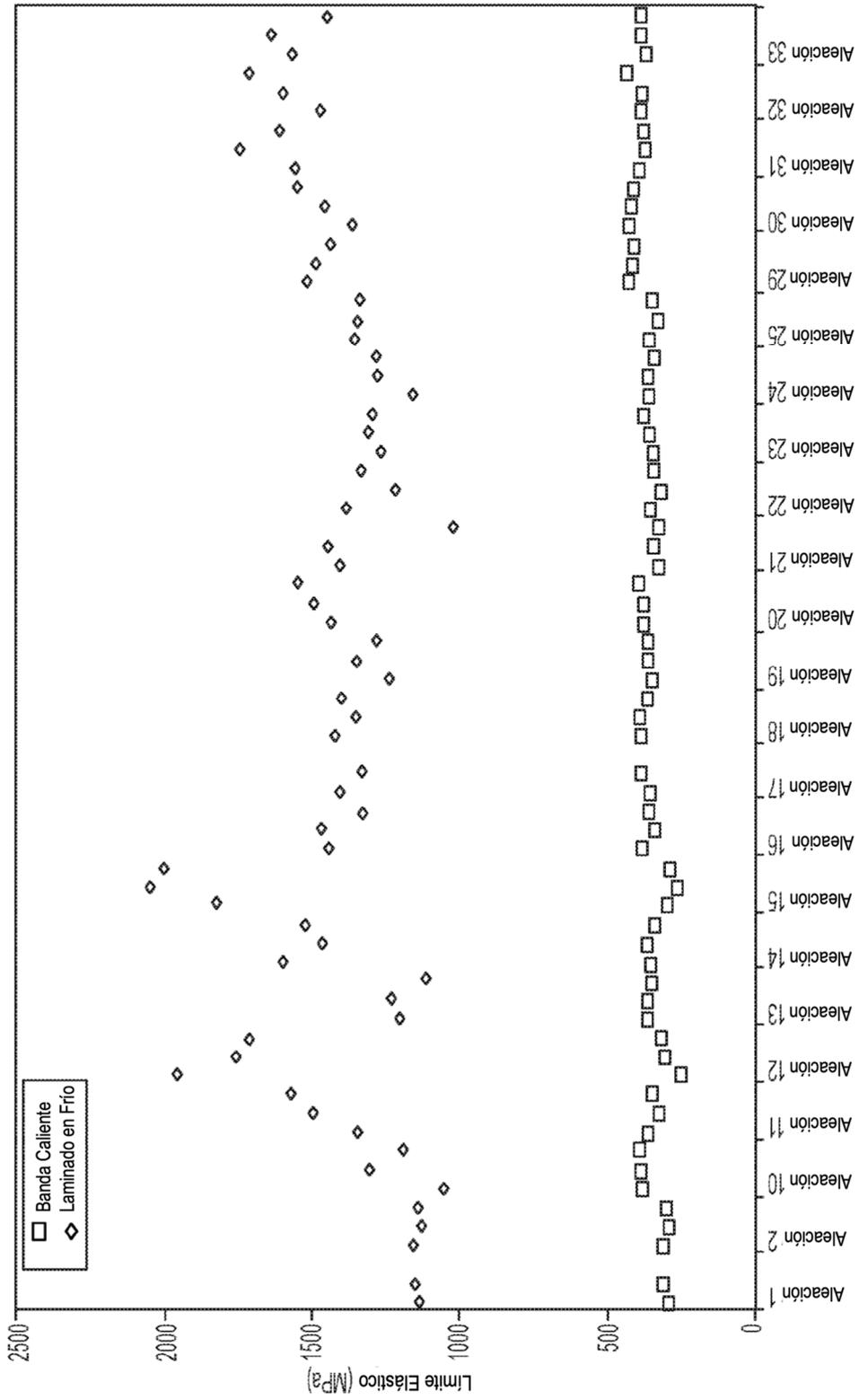


FIG. 6 Límite elástico en aleaciones en este documento antes (banda caliente) y después de laminación en frío (laminado en frío)

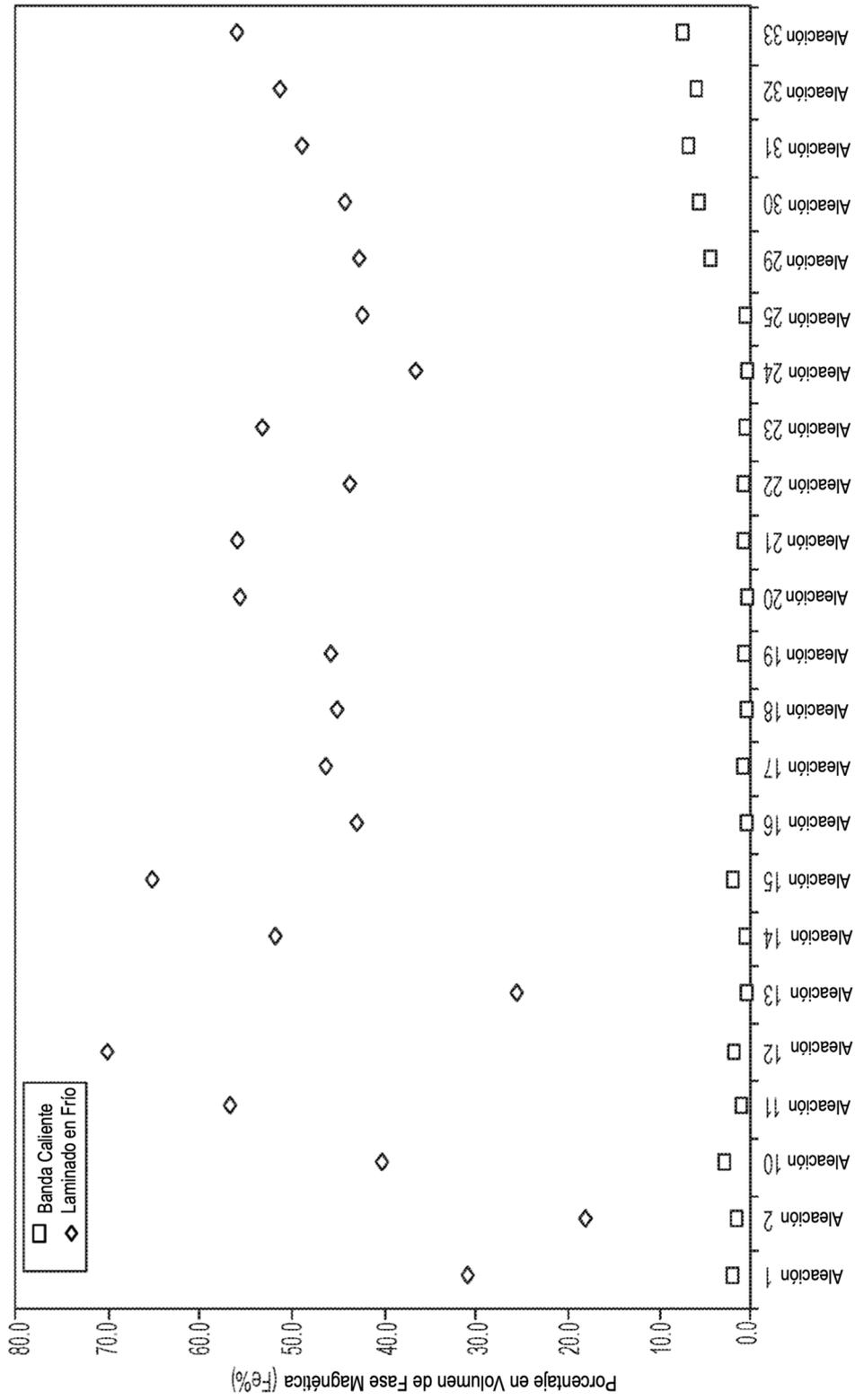


FIG. 7 Porcentaje en volumen de fase magnética en aleaciones en este documento antes (banda caliente) y después de laminación en frío (laminado en frío)

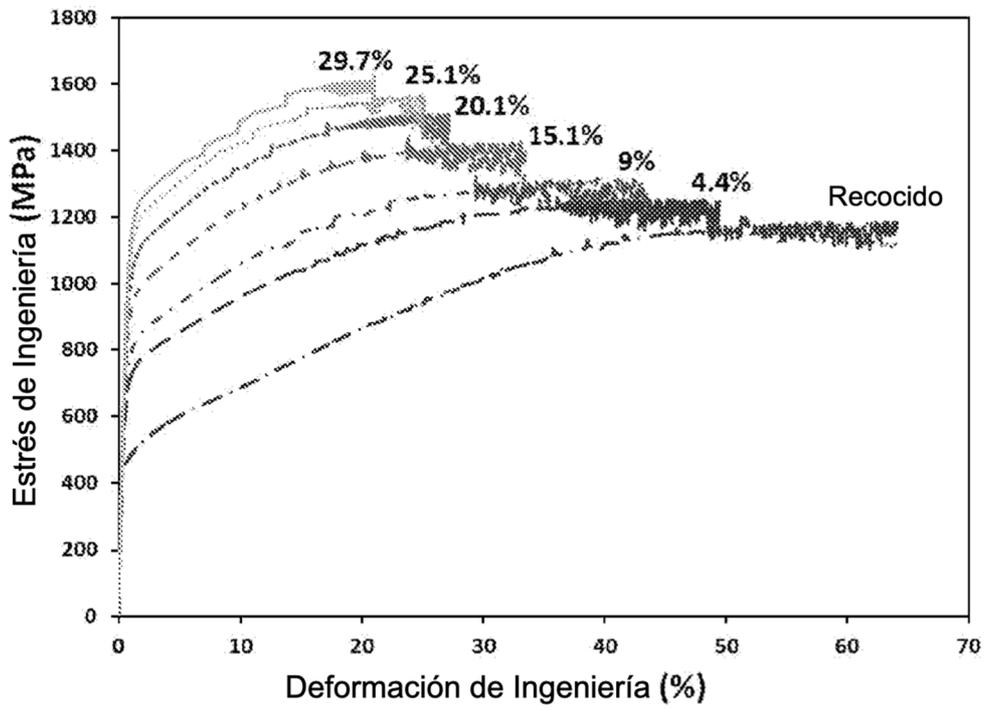


FIG. 8 Curvas de estrés-deformación por tracción para aleación 2 después de laminación en frío con diversas reducciones.

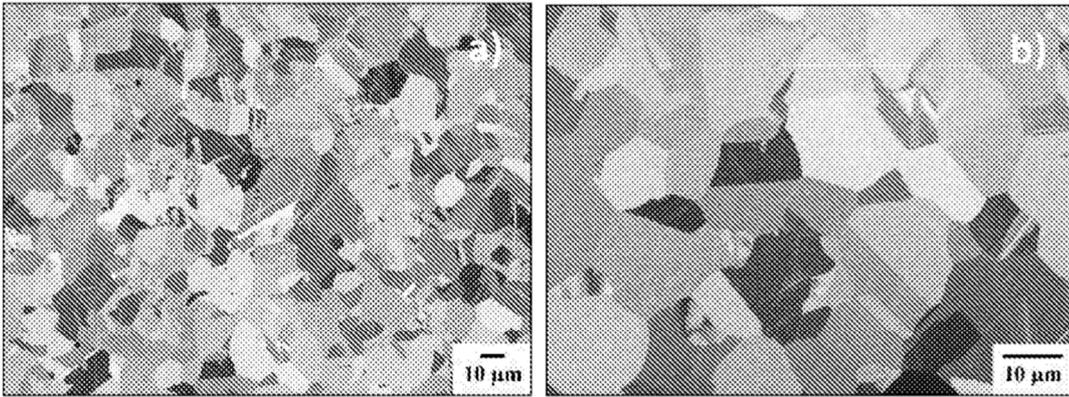


FIG. 9 Micrografía de SEM retrodispersada de la microestructura en la banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

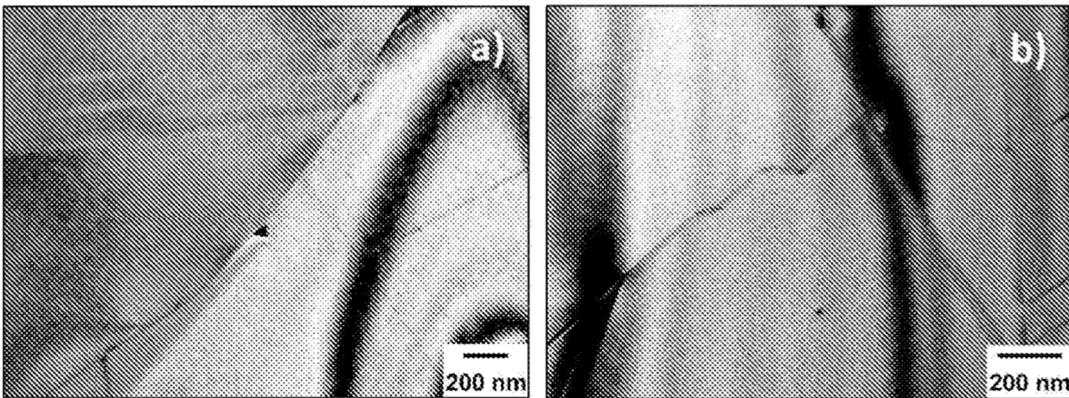


FIG. 10 Micrografía de TEM de campo claro de la microestructura en la banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

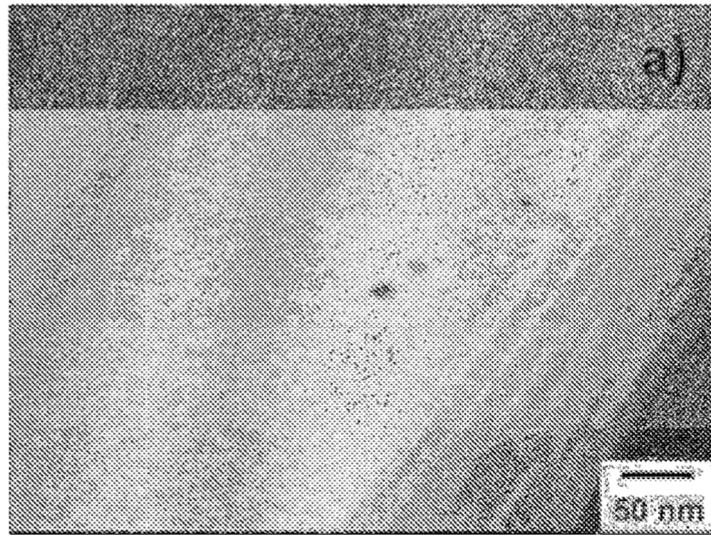


FIG. 11 Micrografía de TEM que muestra precipitados a nanoescala en la banda caliente desde aleación 2.

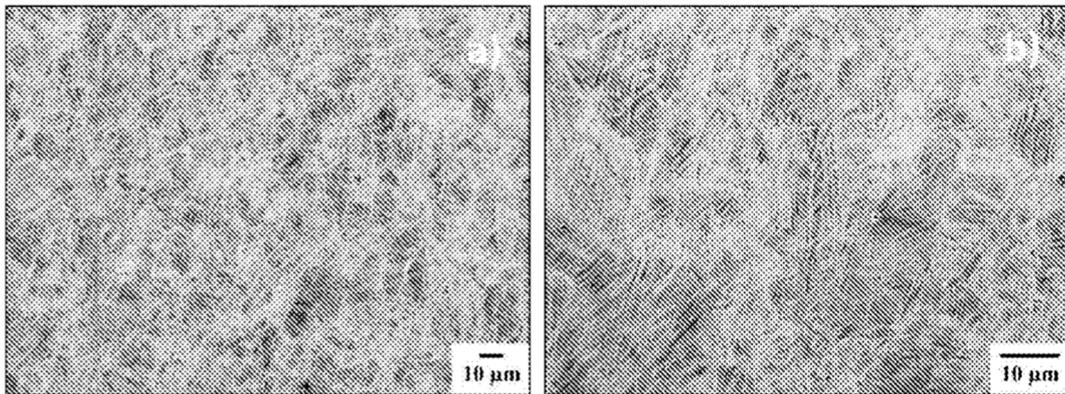


FIG. 12 Micrografía de SEM retrodispersada de la microestructura en la lámina laminada en frío desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

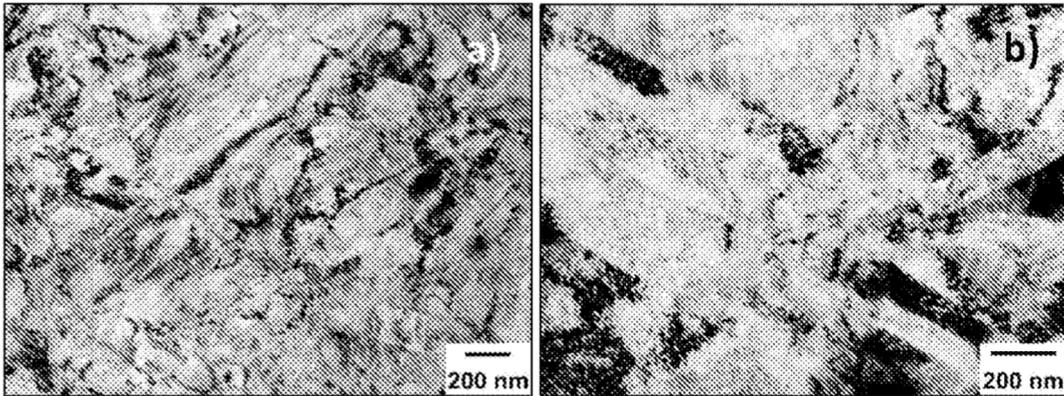


FIG. 13 Micrografía de TEM de la microestructura en la lámina laminada en frío desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

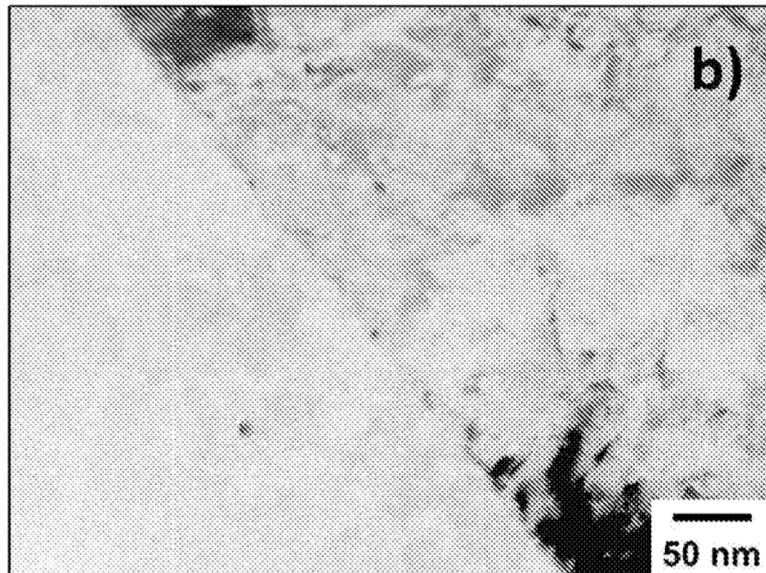


FIG. 14 Micrografía de TEM que muestra precipitados a nanoescala encontrados en lámina de aleación 2 después de deformación en frío.

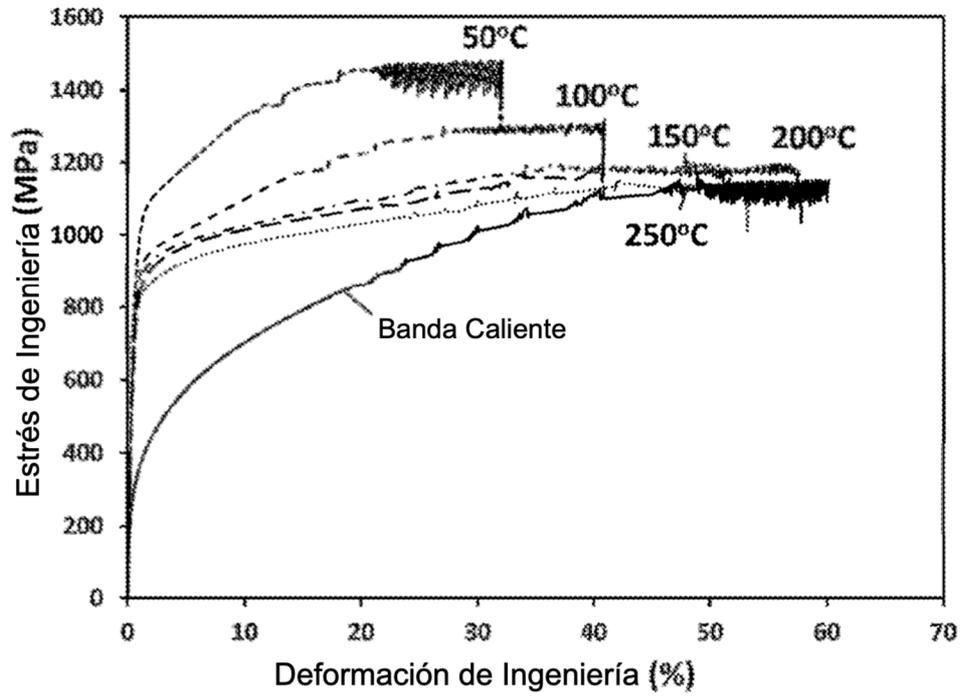


FIG. 15 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 2 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

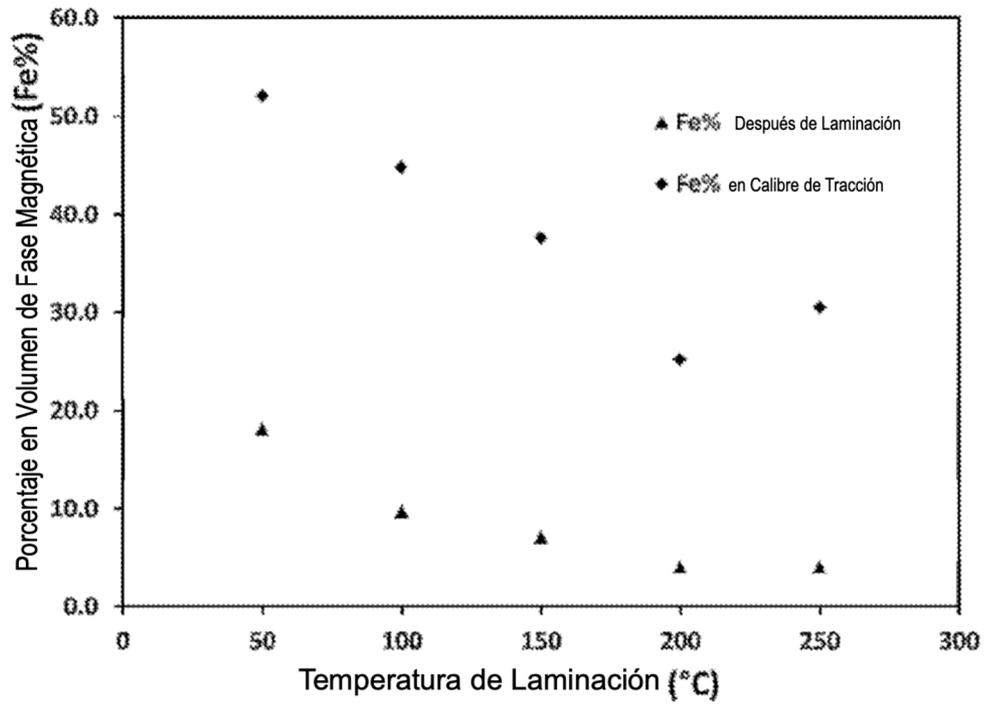


FIG. 16 Cambio en porcentaje en volumen de fases magnéticas (Fe%) durante prueba de tracción de aleación 2.

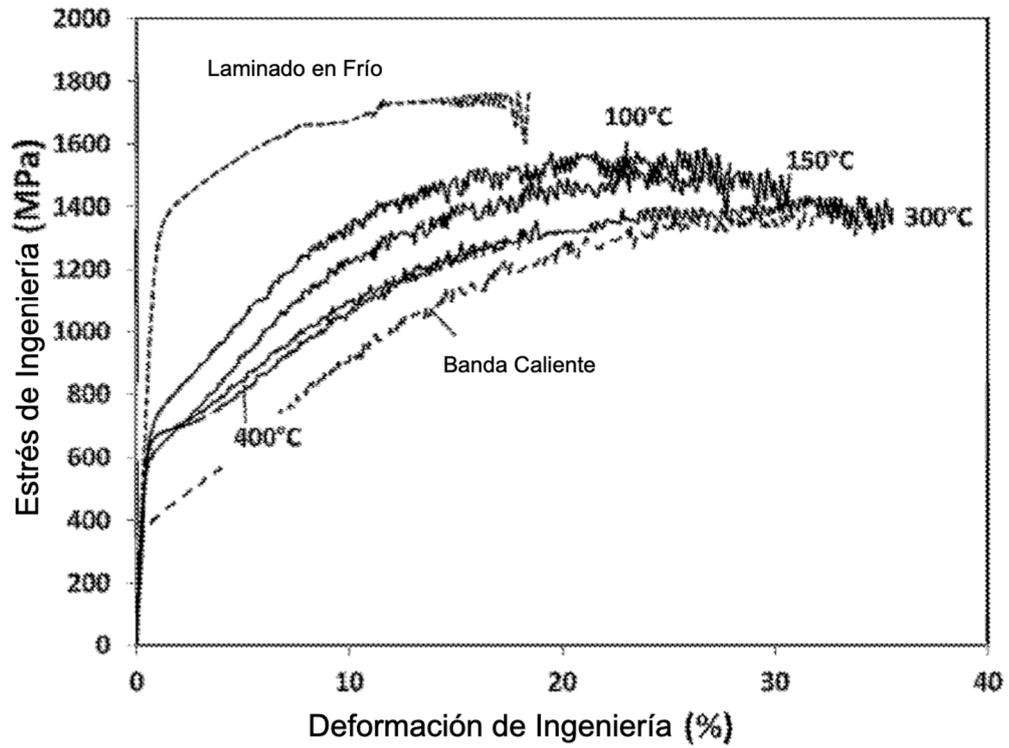


FIG. 17 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 7 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

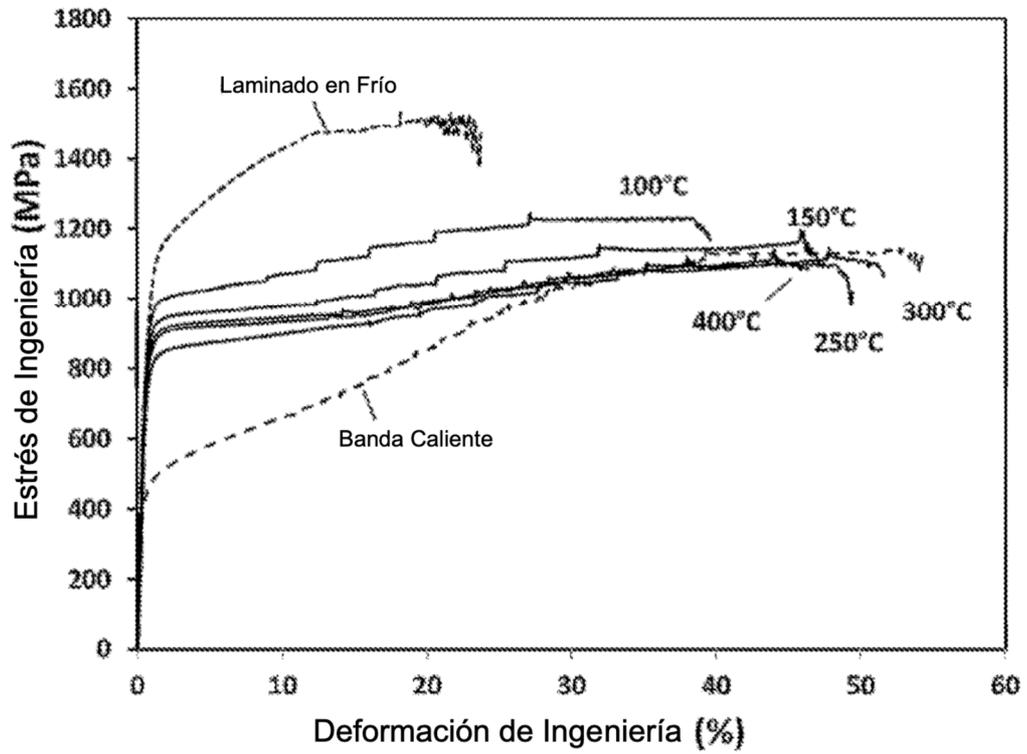


FIG. 18 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 18 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

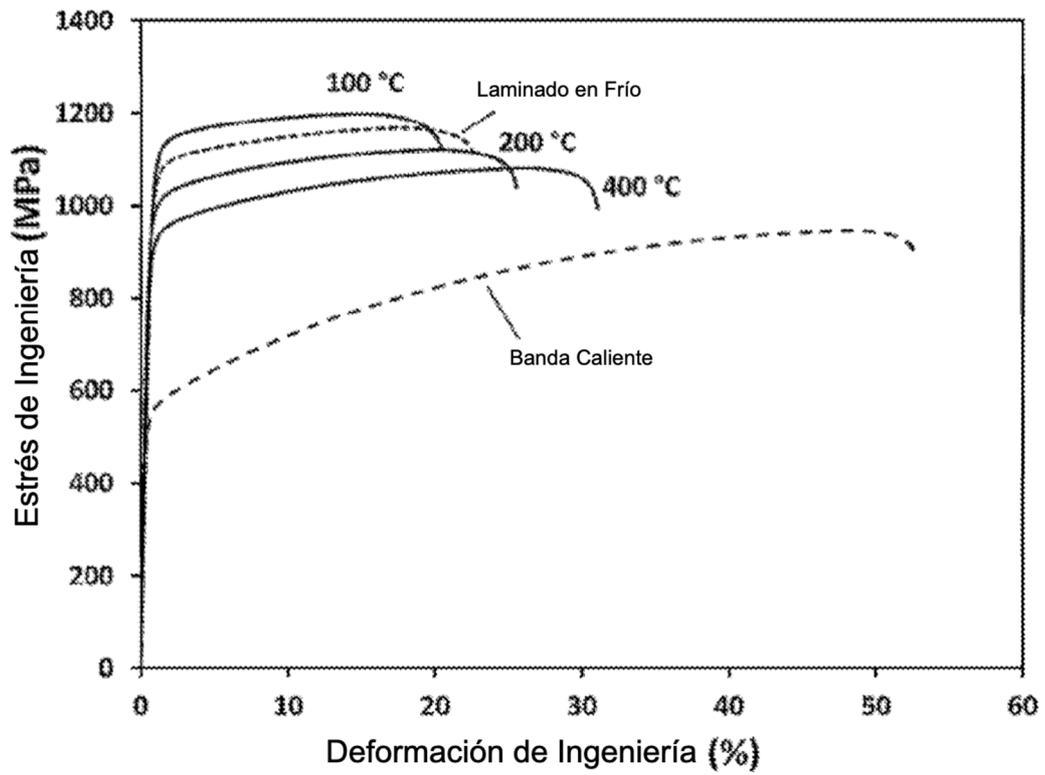


FIG. 19 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 34 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

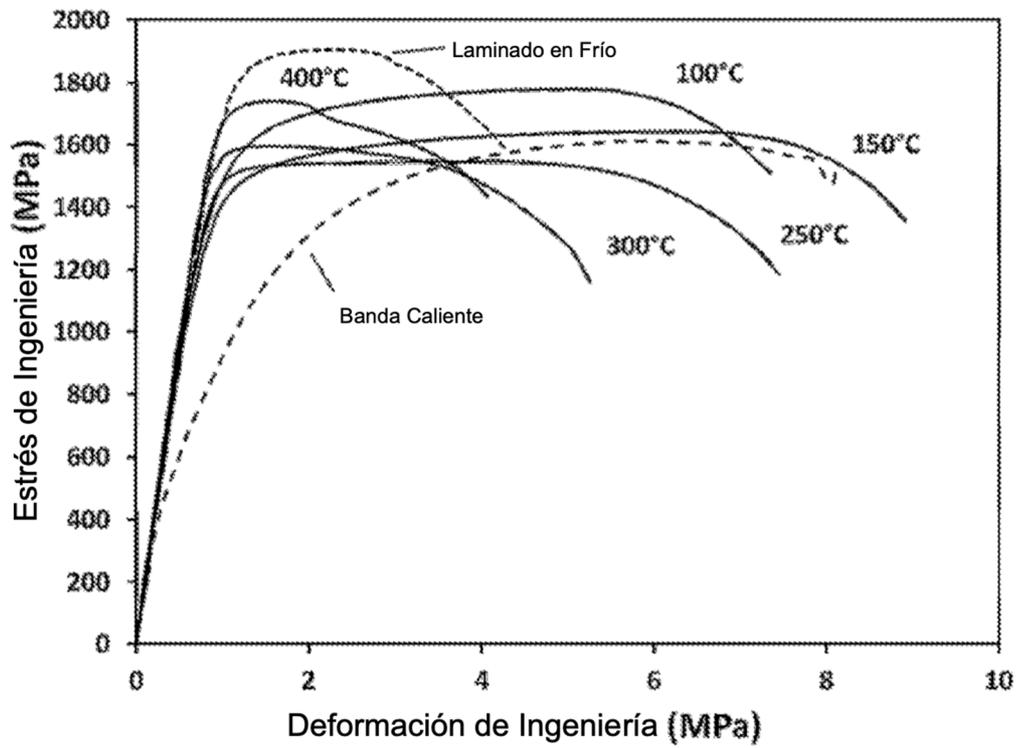


FIG. 20 Curvas de estrés - deformación de ingeniería para aleación 37 después de laminación con reducción de 20 % a diferentes temperaturas.

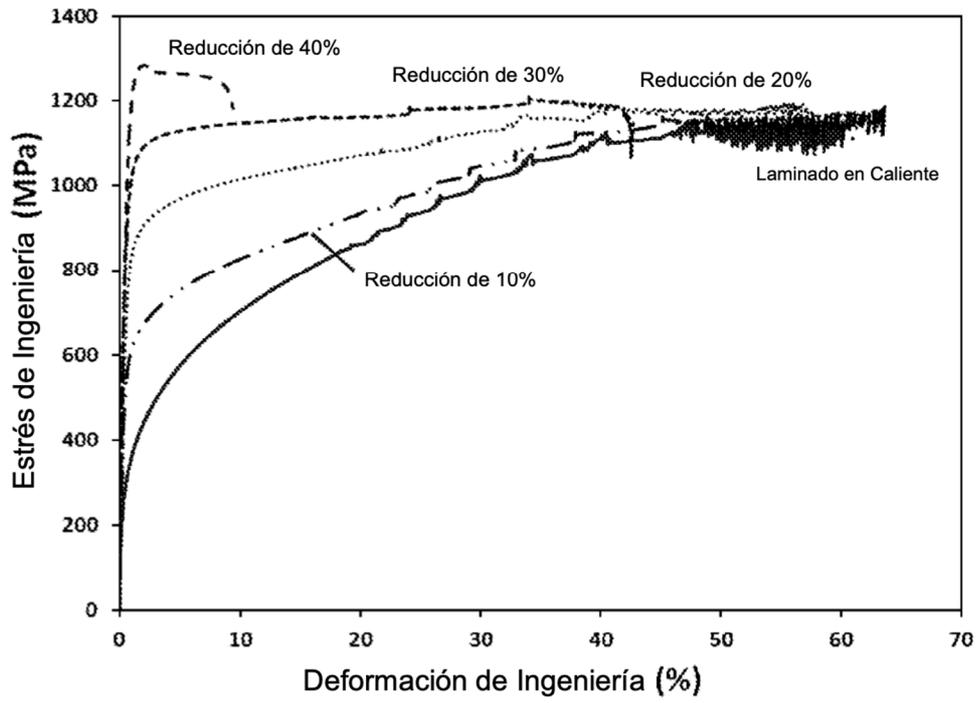


FIG. 21 Curvas de estrés - deformación de ingeniería representativas para aleación 2 que fue laminada a 200 °C con diversas reducciones por laminación.

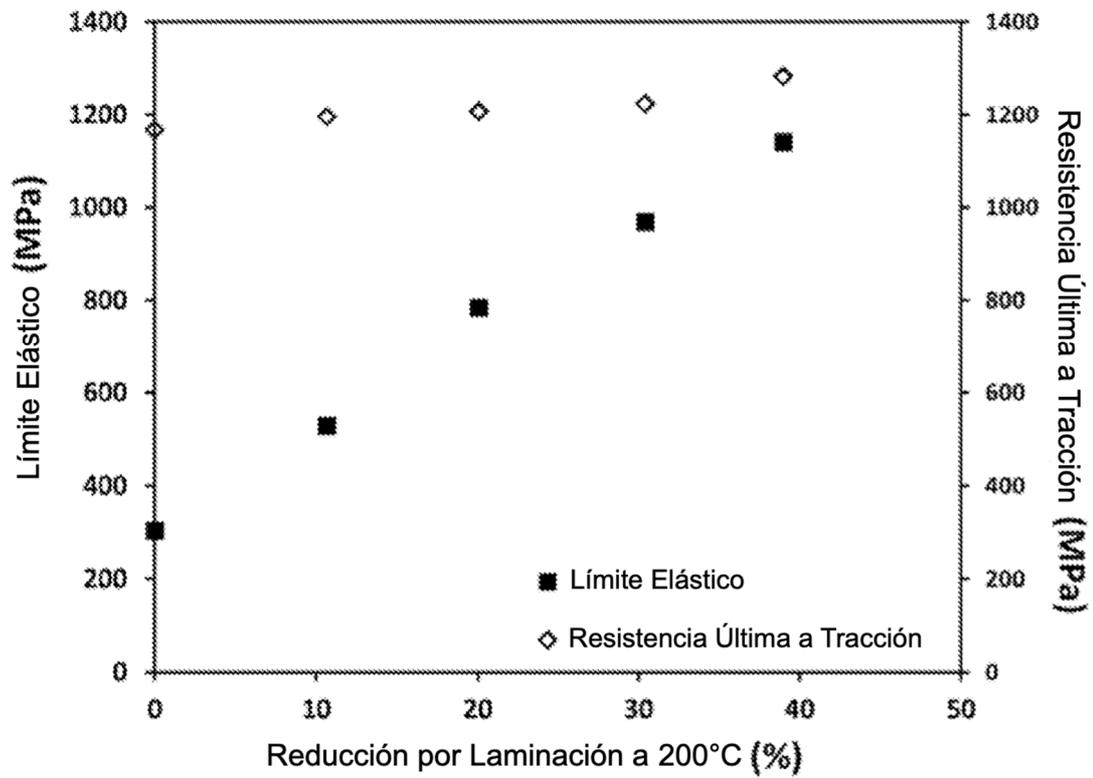


FIG. 22 El límite elástico y resistencia última a tracción de aleación 2 como una función de reducción por laminación a 200 °C. Nótese que el límite elástico aumenta rápidamente a medida que aumenta reducción por laminación, mientras que la resistencia última a tracción aumenta solo ligeramente.

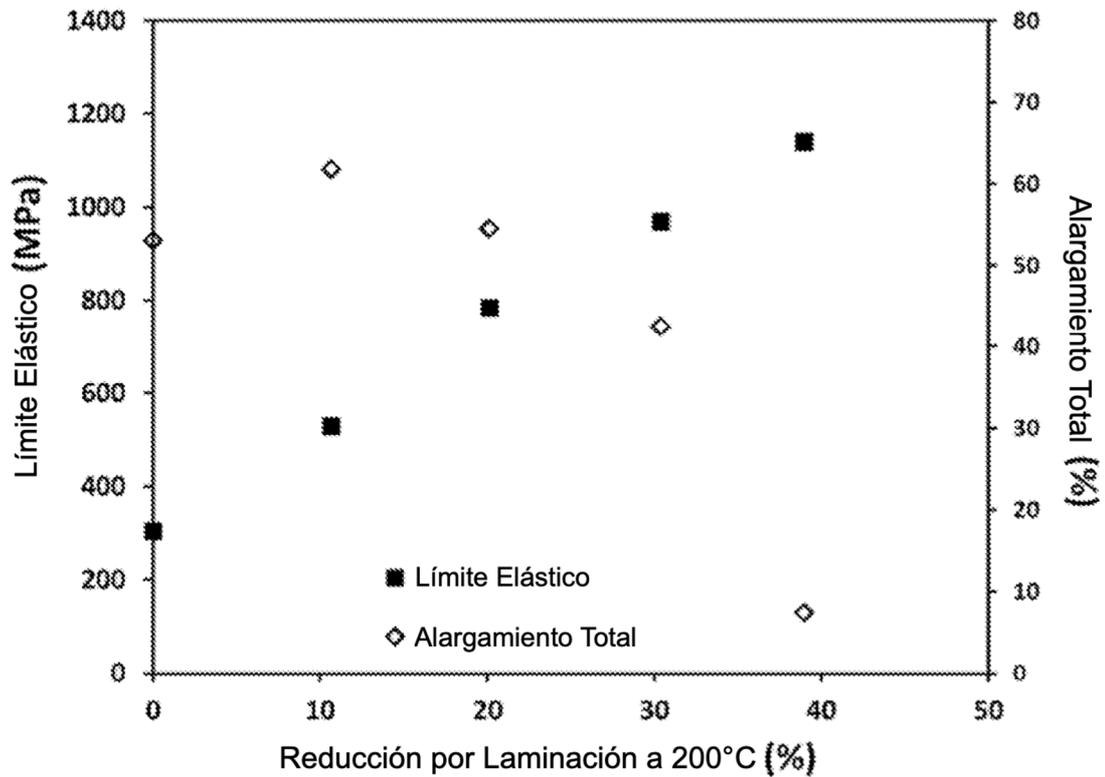
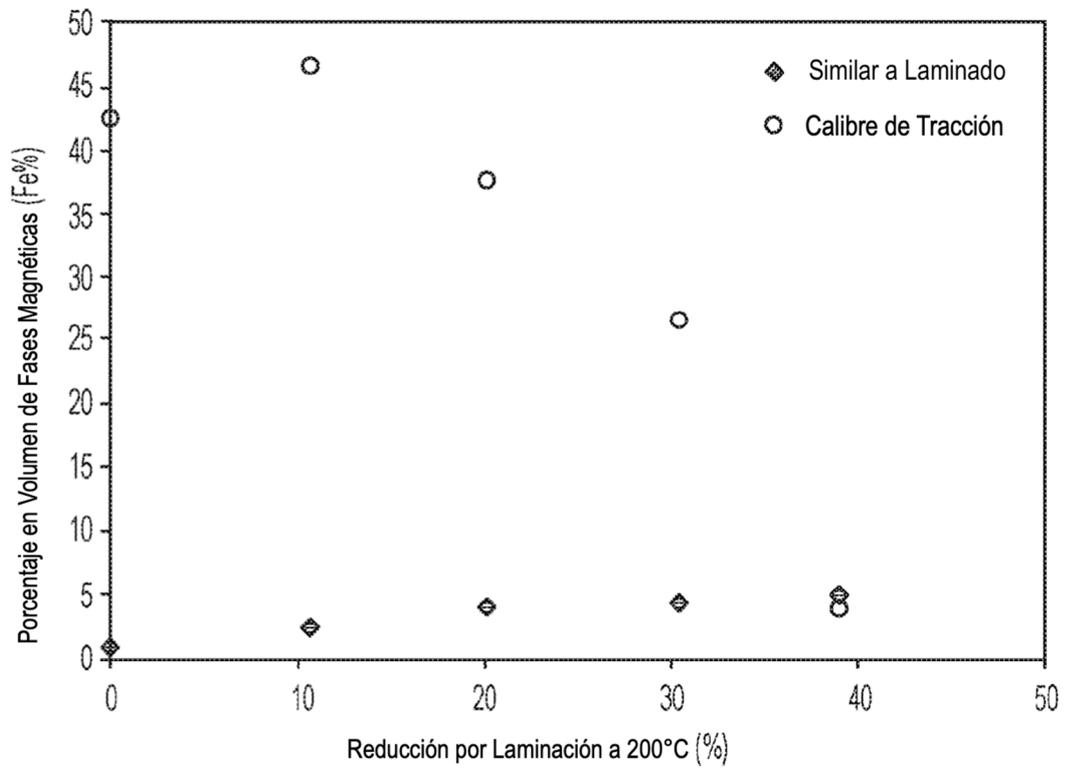


FIG. 23 El límite elástico y alargamiento total de aleación 2 como una función de reducción por laminación a 200 °C. Nótese que el límite elástico aumenta rápidamente a medida que aumenta la reducción por laminación, mientras que el alargamiento total disminuye lentamente hasta reducción de 30 % con caída rápida a 40 %.



**FIG. 24** El efecto de laminación a 200 °C sobre la transformación de fase inducida por deformación en aleación 2 como una función de reducción por laminación. Nótese que la transformación medida en el material similar a laminado está aumentando ligeramente, mientras que la transformación después de la prueba de tracción disminuye rápidamente a través del rango de reducciones por laminación probadas.

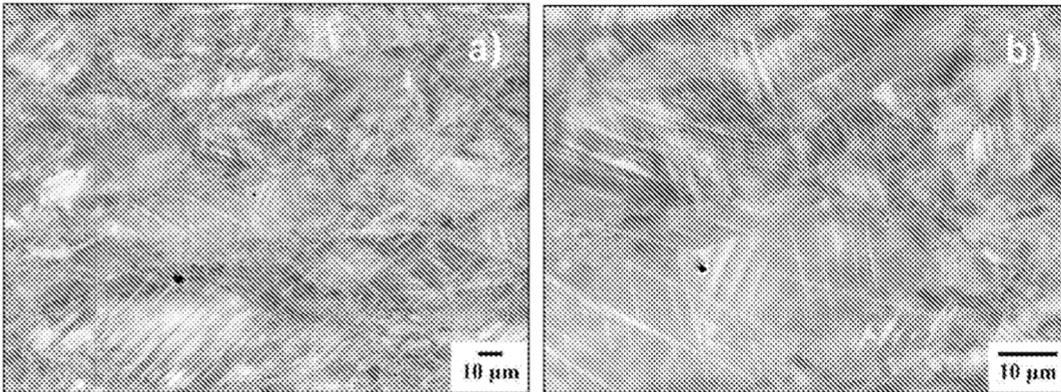


FIG. 25 Micrografía de SEM retrodispersada de microestructura en banda caliente desde aleación 2: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

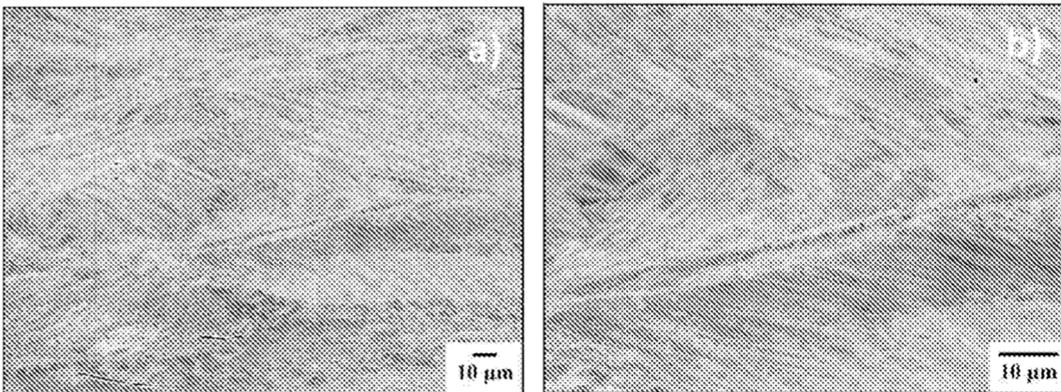


FIG. 26 Micrografías de SEM retrodispersadas de microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C hasta reducción de 30 %: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

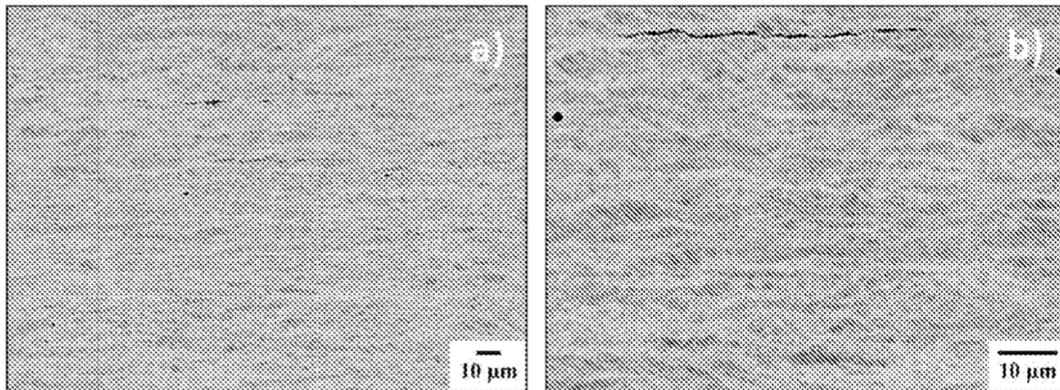


FIG. 27 Micrografías de SEM retrodispersadas de microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C hasta reducción de 70 %: a) imagen de bajo aumento; b) imagen de alto aumento.

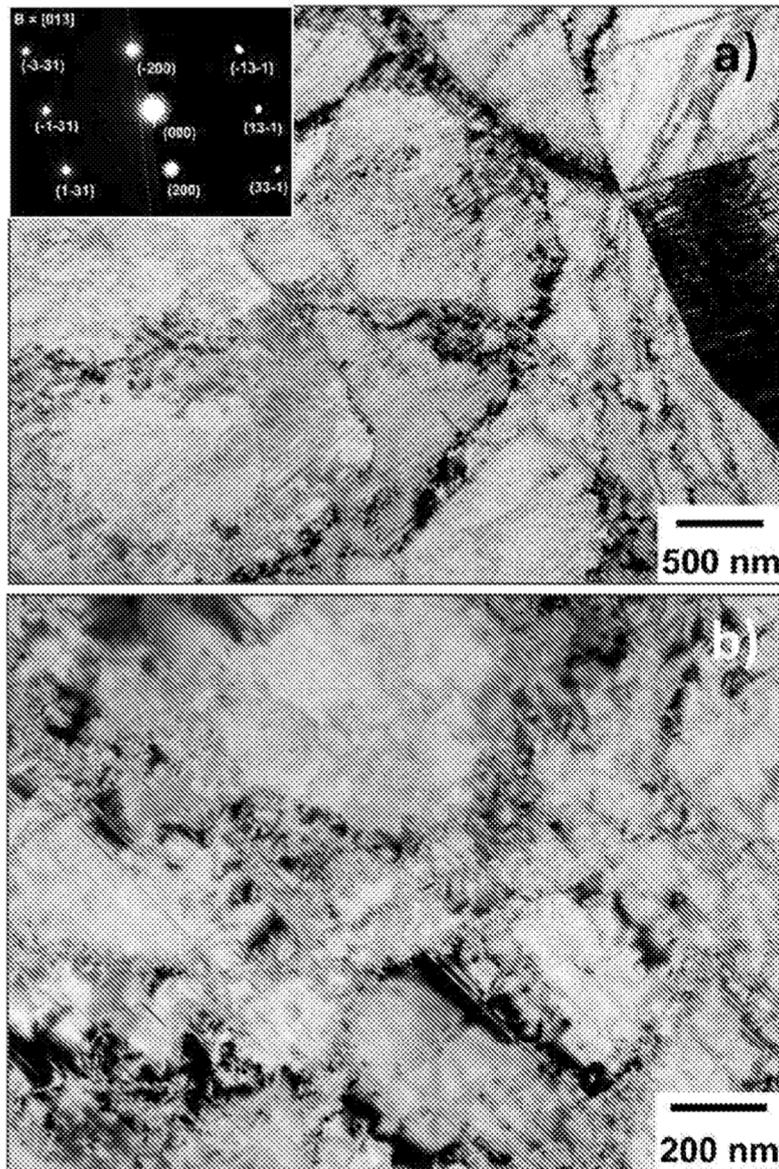


FIG. 28 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 10 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.

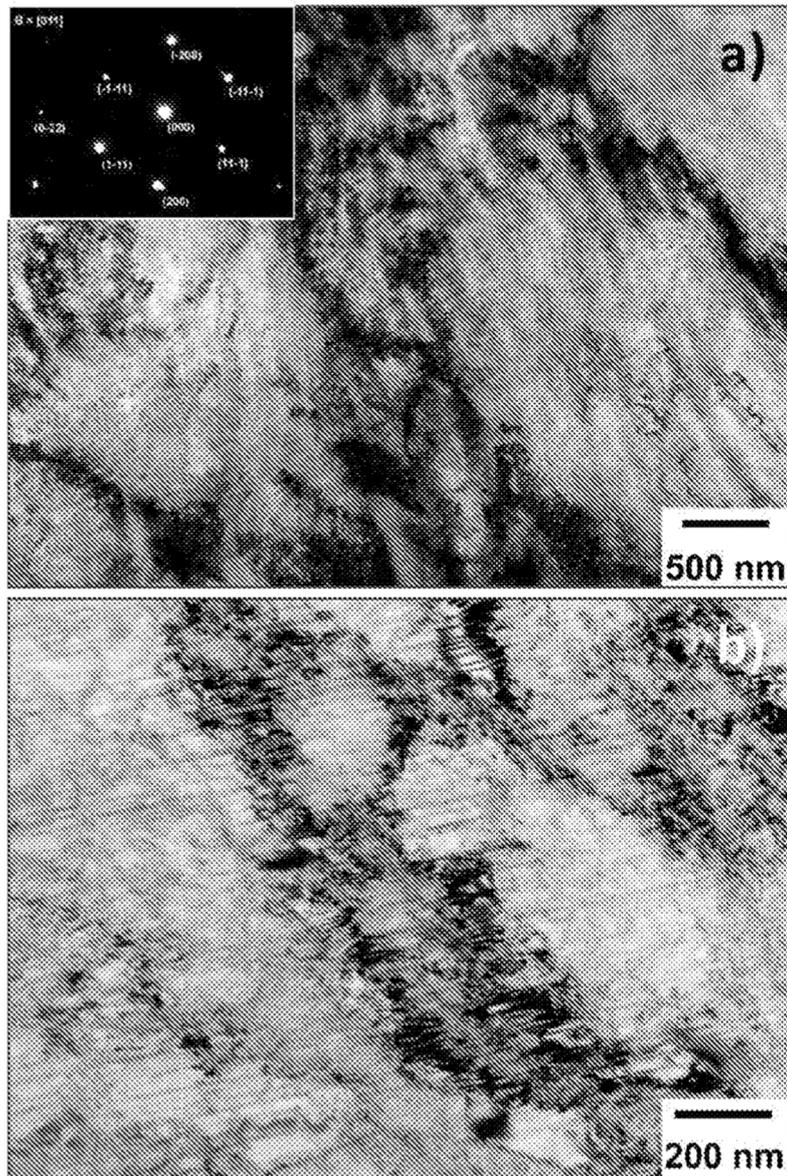


FIG. 29 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 30 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.

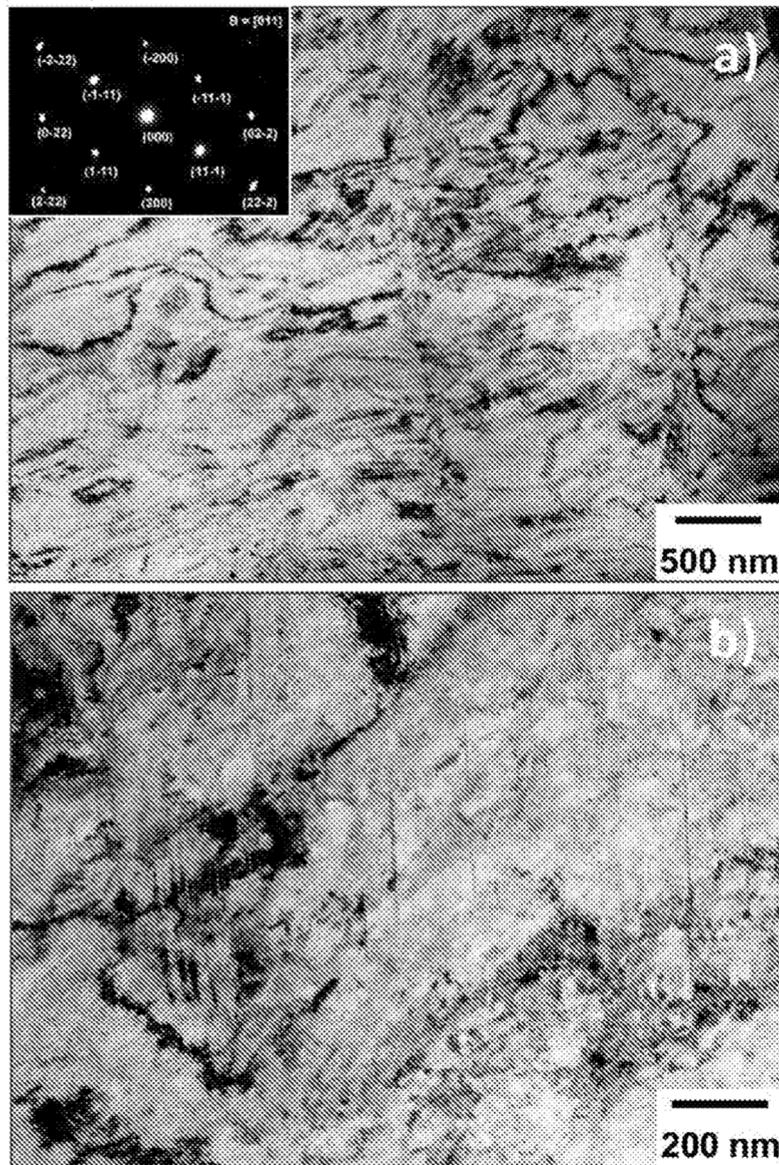
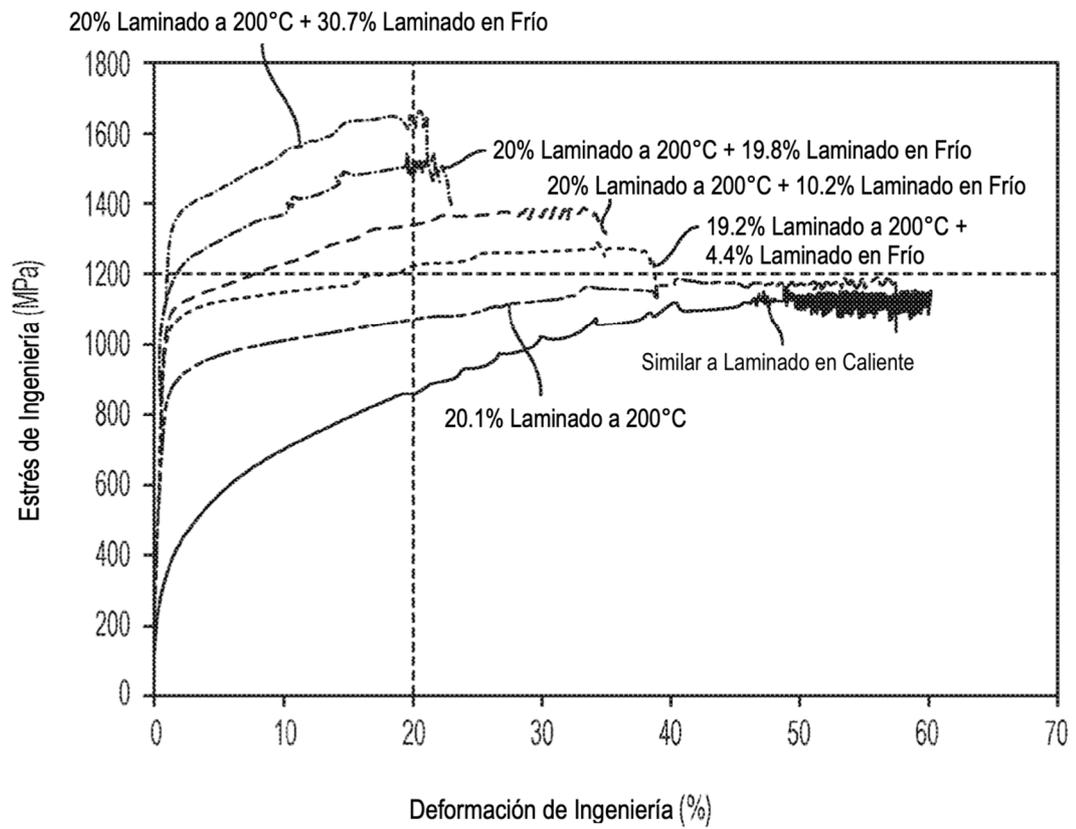
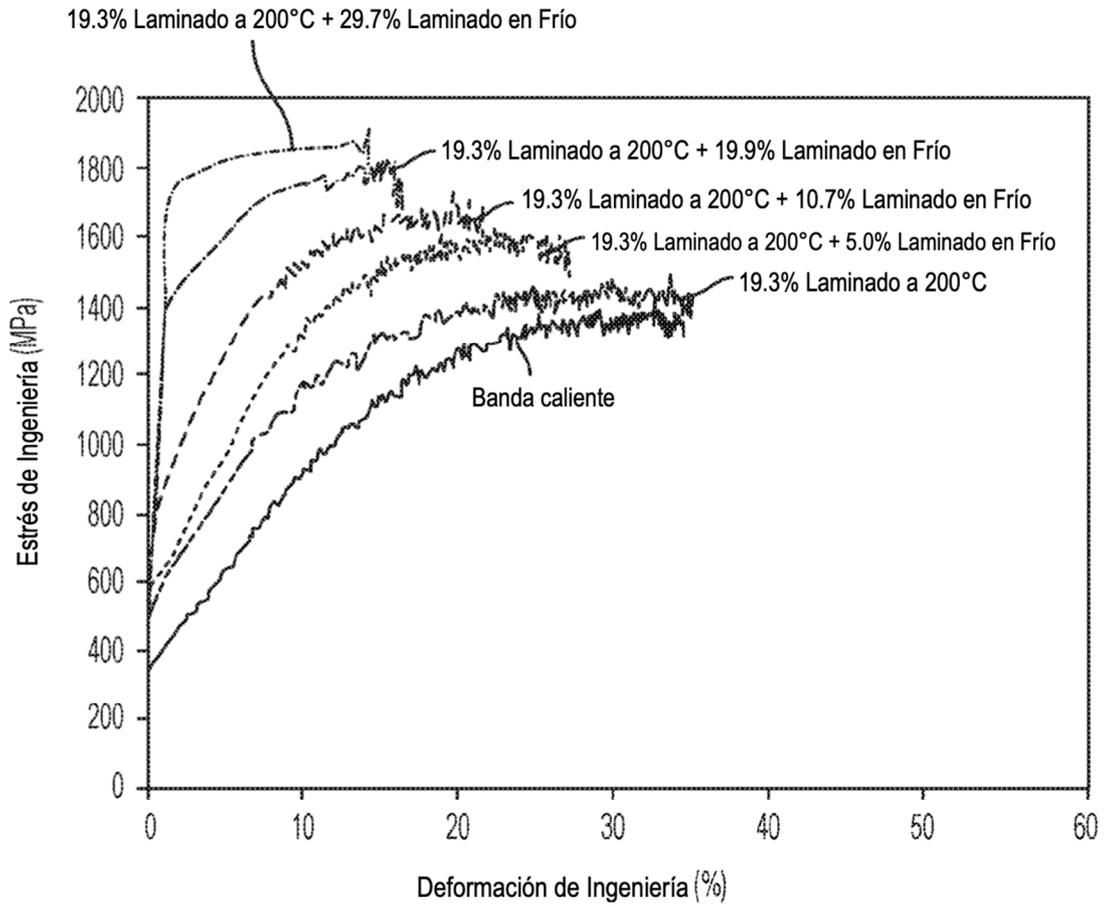


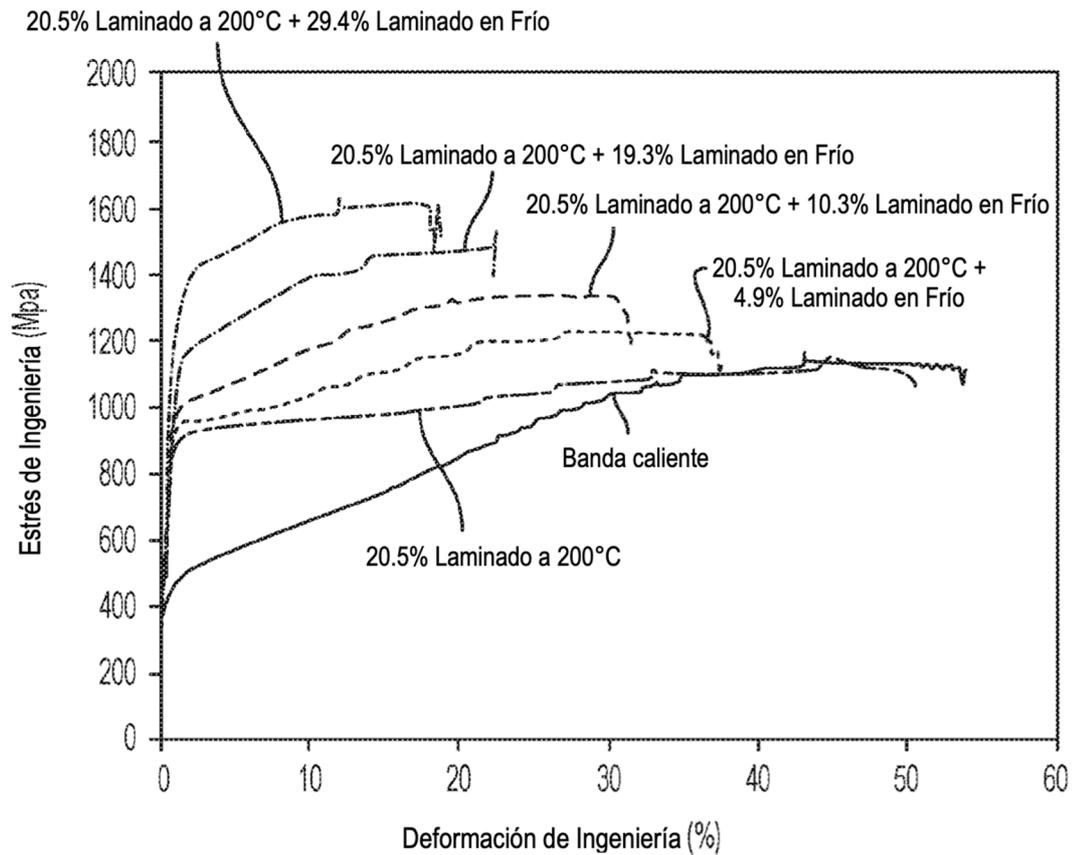
FIG. 30 Micrografías de TEM de campo claro de la microestructura en aleación 2 después de laminación a 200 °C con reducción de 70 %: a) imagen de bajo aumento y b) imagen de alto aumento.



**FIG. 31** Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 2 procesadas mediante combinación de métodos de laminación. Nótese que se enumeran variaciones específicas de condiciones de procesamiento que incluyen la condición similar a laminado en caliente y ya sea laminación de única etapa o de múltiples etapas



**FIG. 32** Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 7 procesadas mediante combinación de métodos de laminación. Nótese que se enumeran variaciones específicas de condiciones de procesamiento que incluyen la condición similar a laminado en caliente y ya sea laminación de única etapa o de múltiples etapas



**FIG. 33** Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 18 procesadas mediante combinación de métodos de laminación. Nótese que se enumeran variaciones específicas de condiciones de procesamiento que incluyen la condición similar a laminado en caliente y ya sea laminación de única etapa o de múltiples etapas.

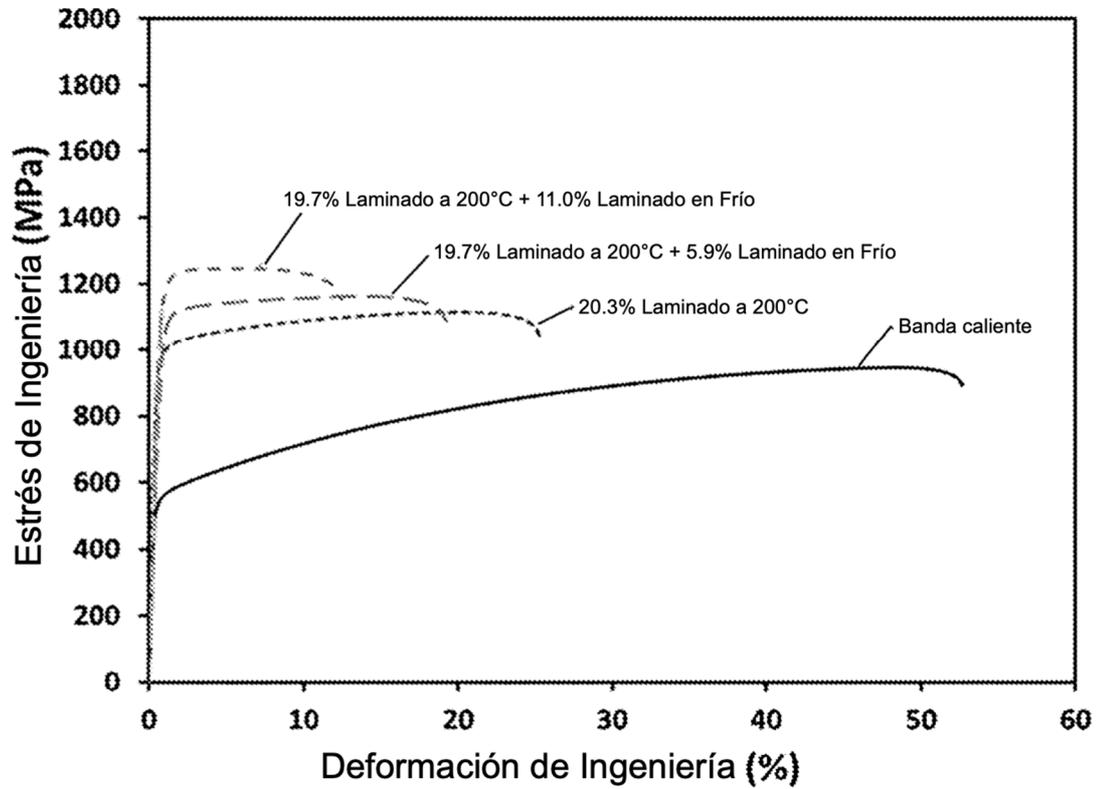
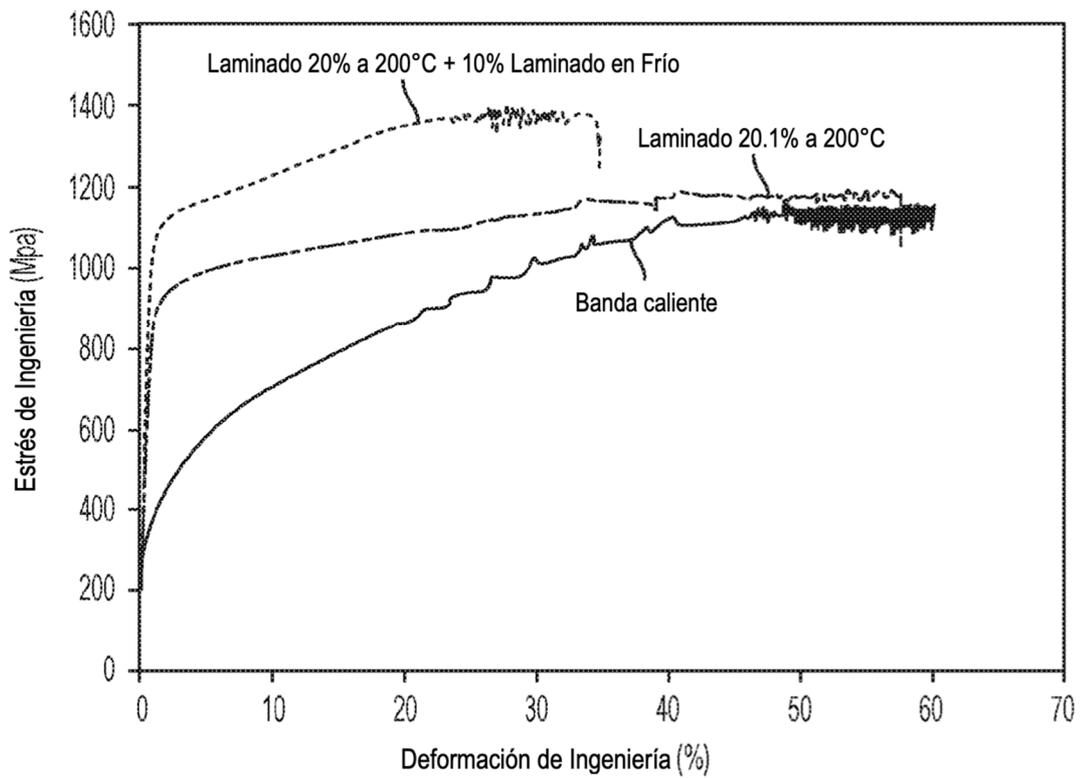


FIG. 34 Curvas de estrés-deformación de ingeniería para aleación 34 procesadas mediante combinación de métodos de laminación. Nótese que se enumeran variaciones específicas de condiciones de procesamiento que incluyen la condición similar a laminado en caliente y ya sea laminación de única etapa o de múltiples etapas.



**FIG. 35** Comparación de curvas de estrés-deformación de ingeniería para lámina de aleación 2 procesadas por diferentes métodos y su combinación. Nótese que se enumeran variaciones específicas de condiciones de procesamiento que incluyen la condición similar a laminado en caliente y ya sea laminación de única etapa o de múltiples etapas.

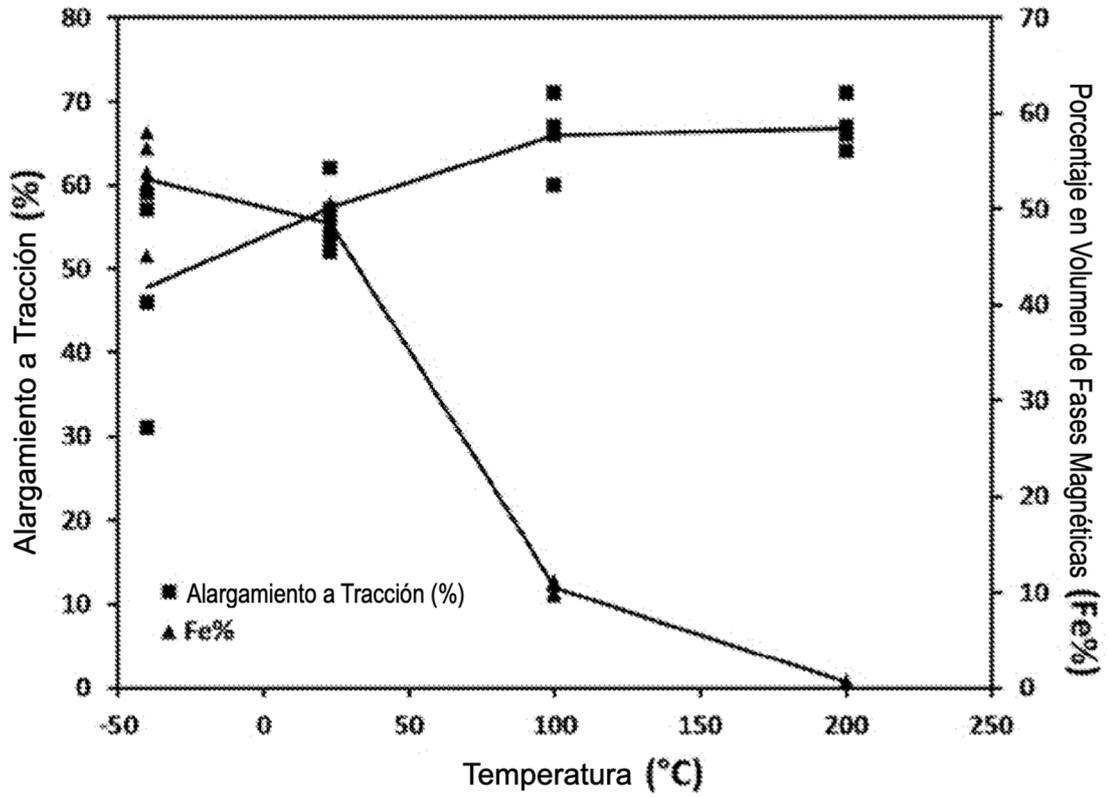


FIG. 36 Alargamiento a tracción y porcentaje en volumen de fases magnéticas en un calibre de muestra de tracción después de prueba de aleación 2 a diferentes temperaturas.

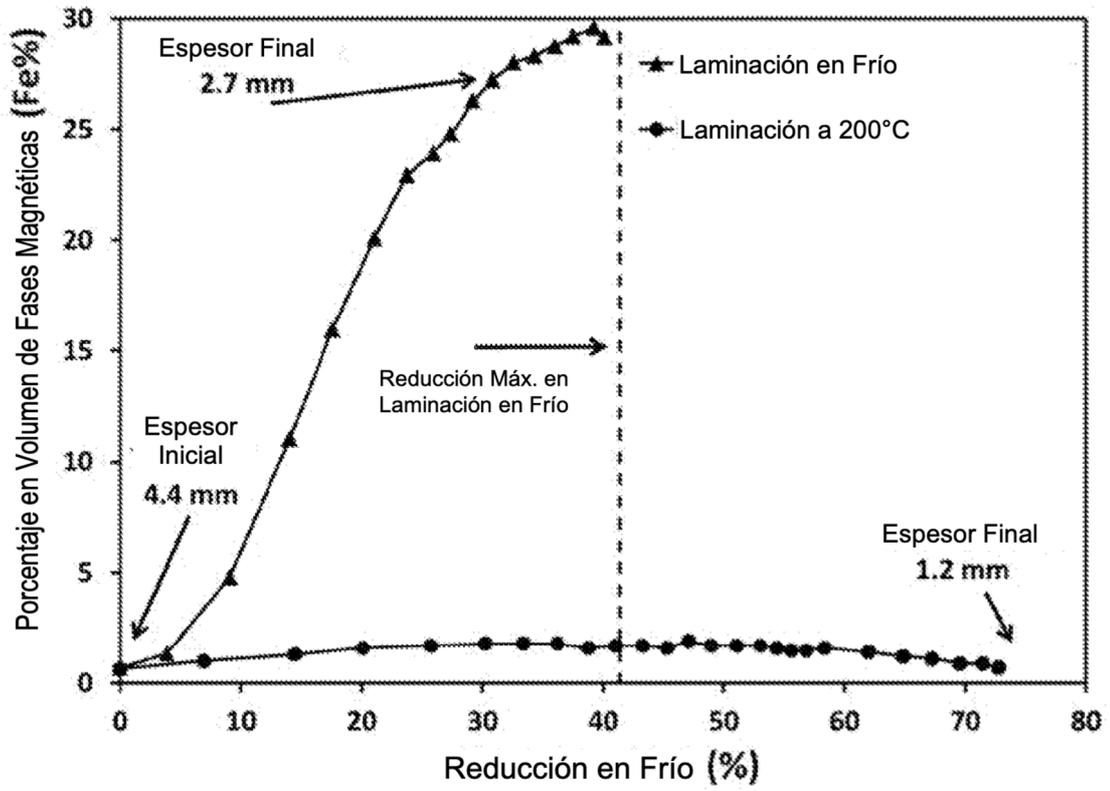


FIG. 37 Porcentaje en volumen de fases magnéticas como una función de reducción por laminación en frío y reducción por laminación a 200°C.

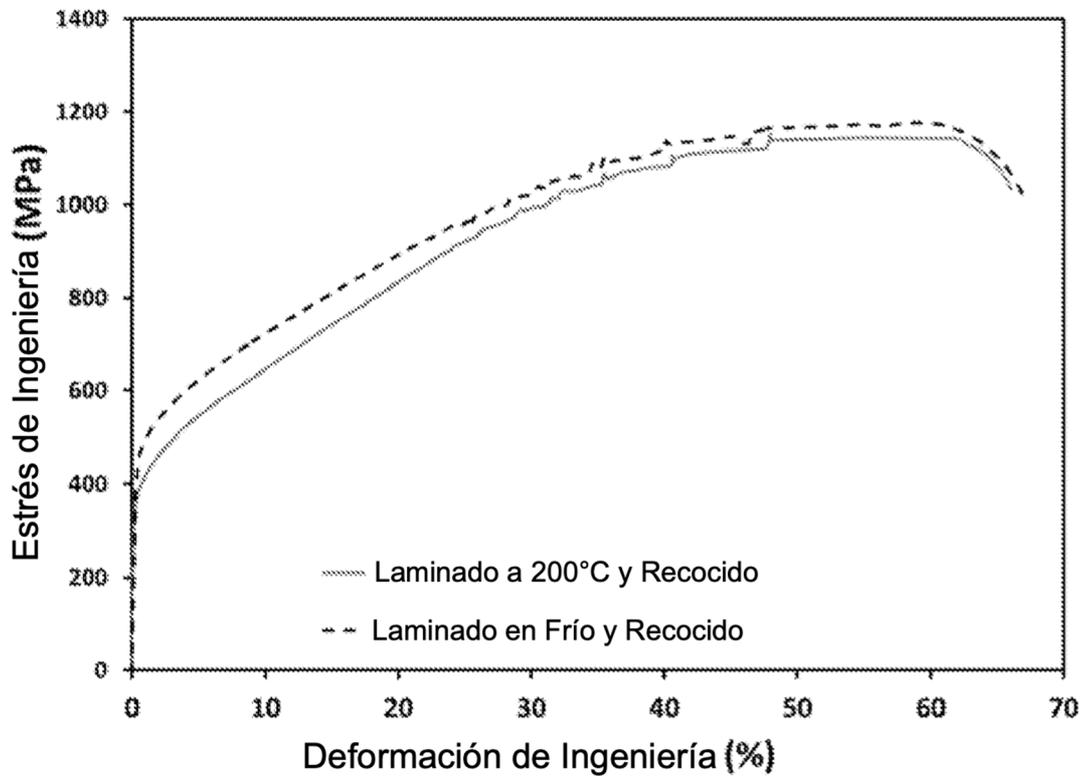


FIG. 38 Ejemplos de curvas de estrés-deformación de ingeniería para la lámina recocida producida tanto por laminación en frío como por laminación a 200 °C.

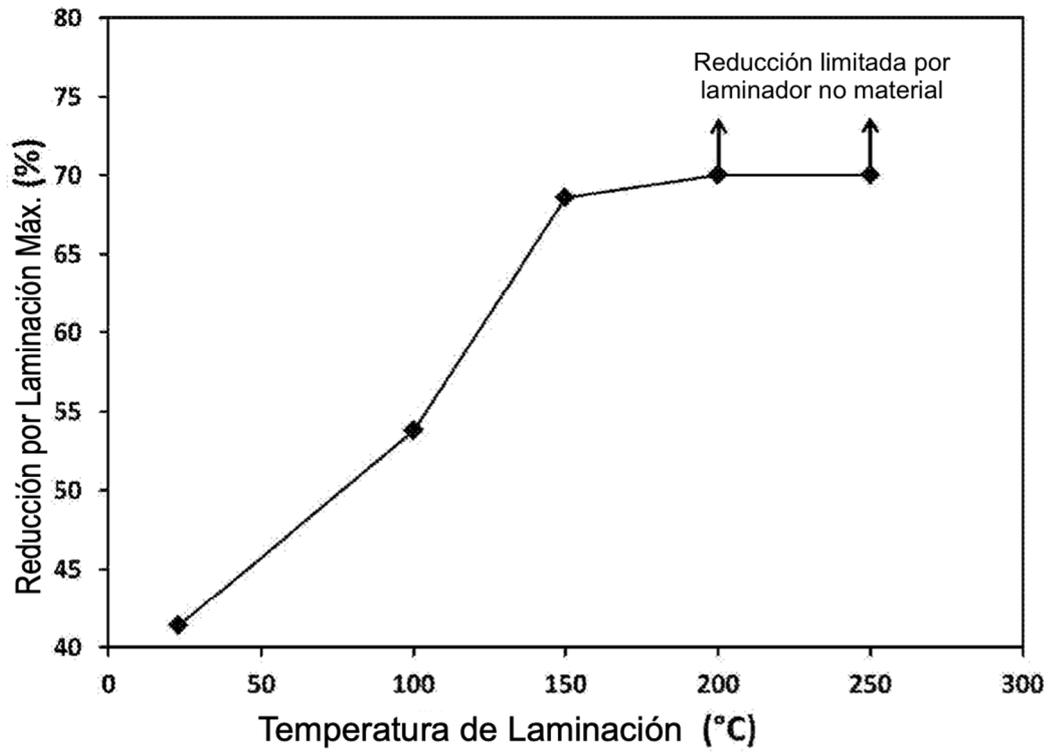


FIG. 39 Límite de reducción por laminación vs temperatura de laminación para aleación 2.